

長大橋の観測データの活用による維持管理支援
システムの検討

報 告 書

令和 2 年 3 月

国立大学法人 京都大学大学院 工学研究科

目 次

第 1 章 研究概要	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 研究実施方針	2
第 2 章 ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査	4
2. 1 特殊橋の維持管理における現状の課題	4
2. 2 近畿管内の特殊橋梁（吊り橋及び斜張橋）の実態	5
2.2.1 吊り橋	5
2.2.2 斜張橋	14
2. 3 今後の課題	17
第 3 章 ケーブル構造の特殊橋モニタリングの実態調査	18
3. 1 動態観測の実施目的	18
3. 2 動態観測設備	19
3. 3 設計検証に関わる検討結果	21
3.3.1 風時の明石海峡大橋の挙動に関する検討	21
3.3.2 明石海峡大橋の長期的な形状管理に関する検討	23
3.3.3 地震時の多々羅大橋・来島海峡大橋の挙動に関する検討	23
3. 4 諸外国の吊り形式橋梁のモニタリング例	27
3.4.1 A 橋（小規模斜張橋，オーストラリア）の長期モニタリングシステム	27
3.4.2 T 橋（3 連斜張橋，香港）の長期モニタリングシステム	34
第 4 章 長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備	37
4. 1 概要	37
4. 2 構造同定手法	38
4.2.1 確率部分空間法	38
4.2.2 ベイズ実働モード解析法	39
4. 3 季節変動の推定と調整	43
4.3.1 最小 2 乗回帰モデル	43
4.3.2 スパースモデル	43
4.3.3 ベイズ線形回帰	43
4.3.4 ガウス過程回帰	44
4.3.5 自己回帰和分移動平均モデル	44
4.3.6 共和分・多変量誤差修正モデル	45
4. 4 まとめ	47

第 5 章 長期計測データにおける季節変動の調査	48
5. 1 概要	48
5. 2 吊り橋の長期計測データの分析	48
5. 2. 1 モニタリング概要	48
5. 2. 2 長期モニタリングの季節変動の回帰分析	51
5. 3 一般橋の長期計測データの分析	58
5. 3. 1 モニタリング概要	58
5. 3. 2 長期モニタリングの季節変動の回帰分析	61
5. 4 季節変動の回帰モデルによる異常検知への試み	65
5. 5 まとめ	67
第 6 章 研究会議事録	68
6. 1 第 1 回研究会 議事録（令和元年 8 月 8 日）	69
6. 2 第 2 回研究会 議事録（令和元年 10 月 30 日）	73
6. 3 第 3 回研究会 議事録（令和 2 年 1 月 17 日）	77
6. 4 幹事団事前打合せメモ（令和 2 年 1 月 14 日）	81
巻末資料	
1. 特殊橋梁（吊り橋及び斜張橋）一覧表	83

第1章 研究概要

1.1 研究目的

本研究プロジェクトの目的は、ケーブル構造を持つ特殊橋について利用可能な計測データおよび目視点検記録から特殊橋の維持管理に必要な有益な情報の抽出と橋梁条件や架橋条件、着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界の明確を図り「特殊橋の劣化特性や実態を精査した情報の確保による維持管理手法の検討」を目的とする。

(1) 研究内容

ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査

本州四国連絡高速道路株式会社が保有しているケーブル構造の特殊橋の点検データを活用し、特殊橋における劣化特性や実態を精査し、定期点検の限界を把握する。

ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査

本州四国連絡高速道路株式会社が保有しているケーブル構造の特殊橋のモニタリングデータの実態を調査し、維持管理に有用なモニタリングデータについて調査および整理を行う。これによって特殊橋モニタリングのための問題点や改善点を把握する。

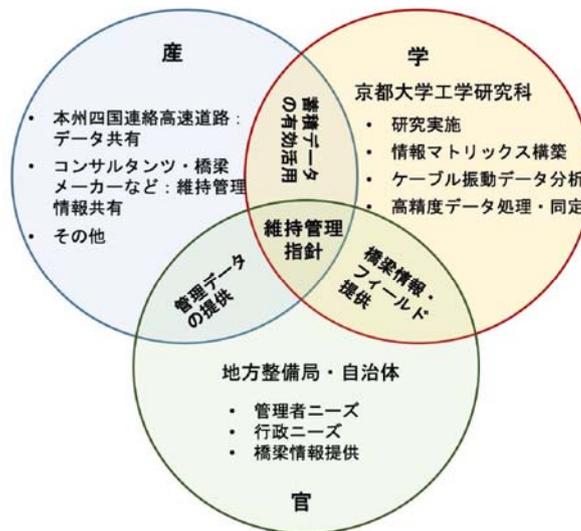
長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備

ケーブル構造の特殊橋の長期のモニタリングデータから橋梁の健全性に関わる特徴量の効率的な抽出法を整備し、特徴量としてのモード特性のみならず中小スパン橋梁の異常検知で適用された特徴量の特殊橋のモニタリングへの適用性について検討を行う。

長期計測データにおける季節変動の調査

長期モニタリングにおける特徴量の長期にわたる変動と風速、交通量、気温の変化などの環境要因との関連性を調査する。

(3) 研究体制



1.2 研究実施方針

本研究は、下表のメンバーにて実施した。

新都市社会技術融合創造研究会 プロジェクトチーム メンバーリスト 「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」

	氏名	所属・役職	備考
学	金 哲佑	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授	PJ リーダー
	八木 知己	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授	代表者
	五井 良直	京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 助教	
	玉越 隆史	京都大学経営管理大学院 特定教授	オブザーバー
産	小野和行	株式会社 エイト日本技術開発 国土インフラ事業部 関西支社, 道路・構造グループ	幹事
	遠山直樹	本州四国連絡高速道路(株)長大橋技術センター	
	丸山武士	株式会社長大 西日本構造事業部	幹事
	織田敏彰	株式会社長大 西日本構造事業部	
	榊 一平	神鋼鋼線工業株式会社	
	(三輪 清貴)	東京製綱株式会社 鋼構造ケーブル部	R2.1退任
	矢島 卓	東京製綱株式会社 鋼構造ケーブル部	R2.1後任
官	吉津 宏夫	道路部 道路保全企画官	
	大坪 裕	道路部 道路管理課長	
	小丸 博司	道路部 道路管理課長補佐	
	森田 啓司	道路部 道路構造保全官	整備局 窓口
	上原 秀樹	近畿技術事務所 副所長	
	濱本 敬治	近畿技術事務所 維持管理技術課長	
	坂本 千秋	近畿技術事務所 維持管理技術課 維持管理技術第1係長	
	高祖 亮一	近畿技術事務所 技術情報管理官	契約 担当

(2) 研究実施フローチャート

- 全てのケーブルを対象とした点検とモニタリングの難しさ
- 合理的で体系化された維持管理指針の不在



課題解決における問い

- 自治体が多く管理している吊り形式橋梁の維持管理について、管理者が抱えている現状の課題は何なのか？
- 何をモニタリングするのか？



問いを解決するために

- 吊り形式橋梁の劣化特性や実態の精査
- 吊り形式橋梁対象のモニタリングの実態調査

橋梁形式と損傷

損傷と構造物の挙動

挙動と季節変動



目指すところ

自治体のニーズを考慮した点検マニュアルの役割を果たす資料作成

第2章 ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査

2.1 特殊橋梁の維持管理における現状の課題

ケーブル構造を持つ特殊橋について（吊橋、斜張橋、トラス橋、アーチ橋）点検の手法、精度（品質の確保）・診断の判定について、課題等の聞き取り調査を実施した。

（姫路河川国道、奈良県、和歌山県、京都府 等、14自治体等に聞き取り）

【 全般 】	
①	不可視部の調査をいつ、どのような方法で実施することが適切であるのか、その基準や運用の確立が課題。
②	単純桁橋であれば同種・同規模の橋梁と比較することで、劣化や損傷の程度を比較・判断することができるが、比較対象となるような橋梁が少ない特殊橋においては、その判断が難しく苦慮している。

【 吊り橋 】	
①	どの部材のどのような損傷がどの判定区分なのか判断が難しい。
②	防食テープが巻かれたケーブルについては、近接目視だけではテープ内部の状態を把握することは困難。
③	歩行者用吊橋の技術基準（小規模吊橋指針）が昭和59年から更新されていない。重要なメインケーブルの定着部およびケーブル全体の健全性判断が数値によるものではなく、経験上のものになってしまう。

【 斜張橋 】	
①	ケーブルや支承等の主要部材の詳細調査を実施する必要性の有無について判断が難しい。
②	ケーブル不可視部の点検及び診断精度が課題。
③	PCケーブルのグラウト調査及び修繕。
④	PCケーブルの制振装置破損部分の交換にかかる材料の選定。
⑤	ケーブルの定着部は、橋梁が建設された年代での技術が用いられており、防食材（塗膜・カバー等）の形状もさまざまな技術。橋梁別に製作されている構造を理解して、構造に合わせて定期点検や詳細調査においてさまざまな特殊機器から選定する必要がある。

【 トラス橋 】	
①	トラス斜材のコンクリート埋込部について、近接目視だけではコンクリート内部の鋼材の状態を把握することは困難。

2.2 近畿管内の特殊橋梁（吊り橋及び斜張橋）の実態

近畿2府4県における特殊橋梁に関して、整備局から提供頂いた資料をもとに整理を行った。対象とした特殊橋梁は、「吊り橋」及び「斜張橋」である。

なお、直轄管理の特殊橋は、下表のとおりである。

路線	事務所	出張所	名称	名称フリガナ	竣工年次	全幅員 (m)	有効幅員 (m)	橋梁形式	橋長 (m)	設計活荷重
1	大阪国道	北大阪維持	新桜宮橋	シンザクラバヤハシ	2006	19.75	18.75	2径間連続鋼非合成箱桁橋+単純鋼ローゼアーチ橋	227	B活荷重
483	豊岡河川国道	朝来国道維持	大屋川橋(下り線)	オヤガワハシガリセン	2011	11.15	10.26	単純鋼ニールセンローゼアーチ橋+5径間連続非合成少数数板桁	318.5	B活荷重
29	姫路河川国道	山崎維持	カラウコ大橋	カラウコオハシ	1990	9.7	8.5	単径間鋼箱桁斜張橋+2径間連続RCT桁ラーメン橋	179.5	TL-20

これらの橋梁については、今後、橋梁定期点検結果より損傷状況を確認する必要がある。

以下では、管内自治体管理の特殊橋梁に関する損傷状況等の整理結果を示すものとする。

2.2.1 吊り橋

管内の吊り橋は、全198橋架橋されており、現在も供用されている。その架橋状況は、図2.1に示すとおりである。198橋の内、70%程度の130橋が和歌山県に架橋されており、その他、奈良県、京都府に架橋されている。比較的、地形状況の厳しい府県に架橋されていることが確認できる。



図 2.1 管内吊り橋分布図

図 2.2 には、これら 198 橋の供用年数を示す。

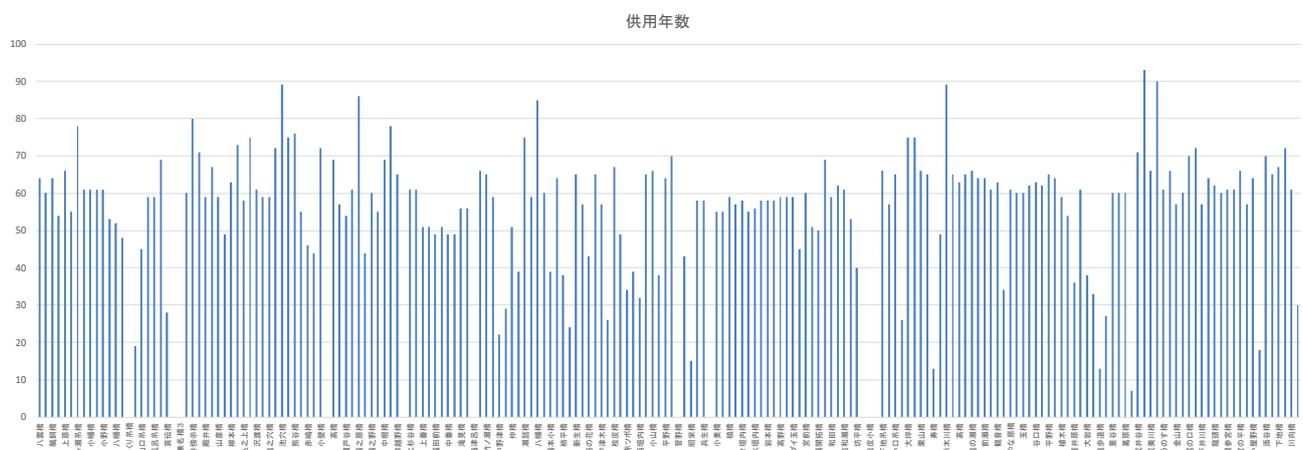


図 2.2 管内吊り橋供用年数

* 便宜上、2020 年を基準として算定

図 2.3 から確認できるように、その大半は架橋 50 年以上経過していることが確認できる。なお、最も古い橋梁は、和歌山県古座川町に架橋されている桑滝橋であり、架橋後 93 年経過している。なお、供用年数毎の分布は図 2.3 に示すとおりである。

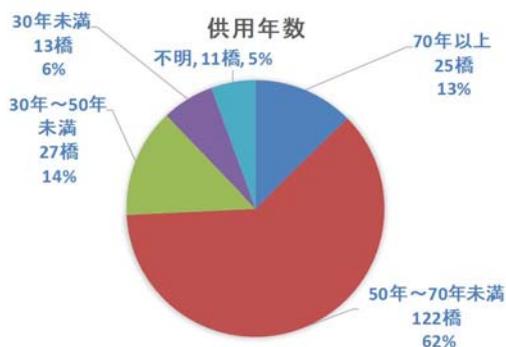


図 2.3 供用年数毎の分布図

図 2.3 から確認できるように、50 年以上経過している橋梁は 147 橋で全体の 75%程度を占めることとなる。そのため、多くの損傷が生じていることが安に推測できる。

図 2.4 には、対象橋梁の橋梁規模を示す。

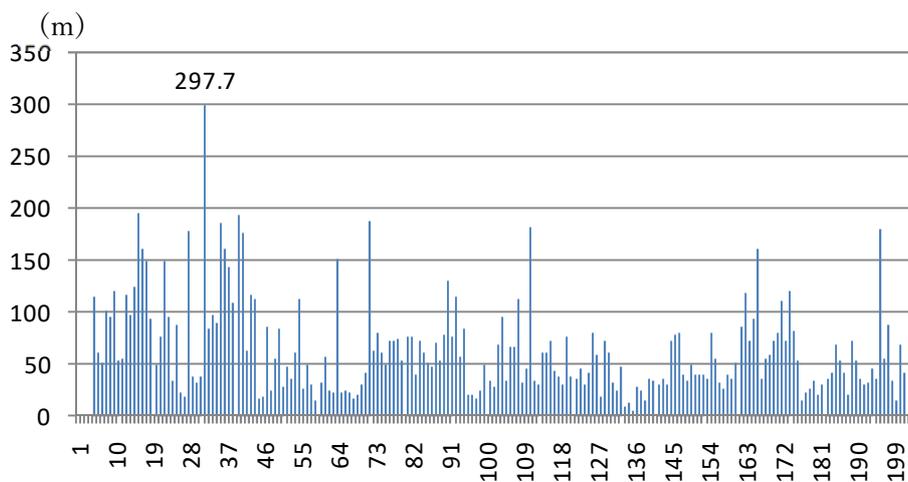


図 2.4 橋梁規模

対象橋梁の平均橋長は、60m 程度である。比較的橋長の長い橋梁は、奈良県十津川村に架橋されている谷瀬大橋 (L=297.7m) である。

これら 198 橋の吊り橋に対して実施されている橋梁点検結果をもとに、その損傷判定区分及び損傷内容を整理した。

まず、損傷判定区分（I~IV）については、図 2.5 に示すとおりである。

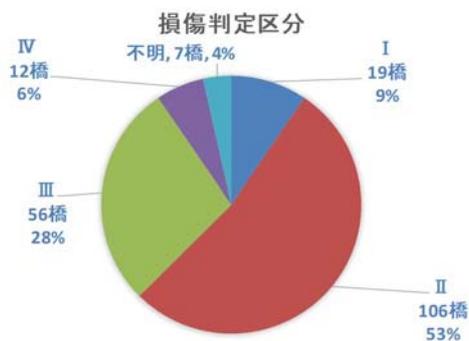


図 2.5 損傷判定区分

この図から、損傷判定I及びIIが比較的多いことが確認できる。なお、何らかの対策が必要とされるIII及びIVの損傷が確認されている橋梁は 68 橋、全体の 35%程度となっている。

なお、損傷状況は巻末の資料に示すとおりで、本研究の着目点である“ケーブル”に係る損傷をピックアップしている。

主な損傷は、

- 主索及び吊索等の破断：オレンジハッチ
- 主索及び吊索等の腐食：緑ハッチ

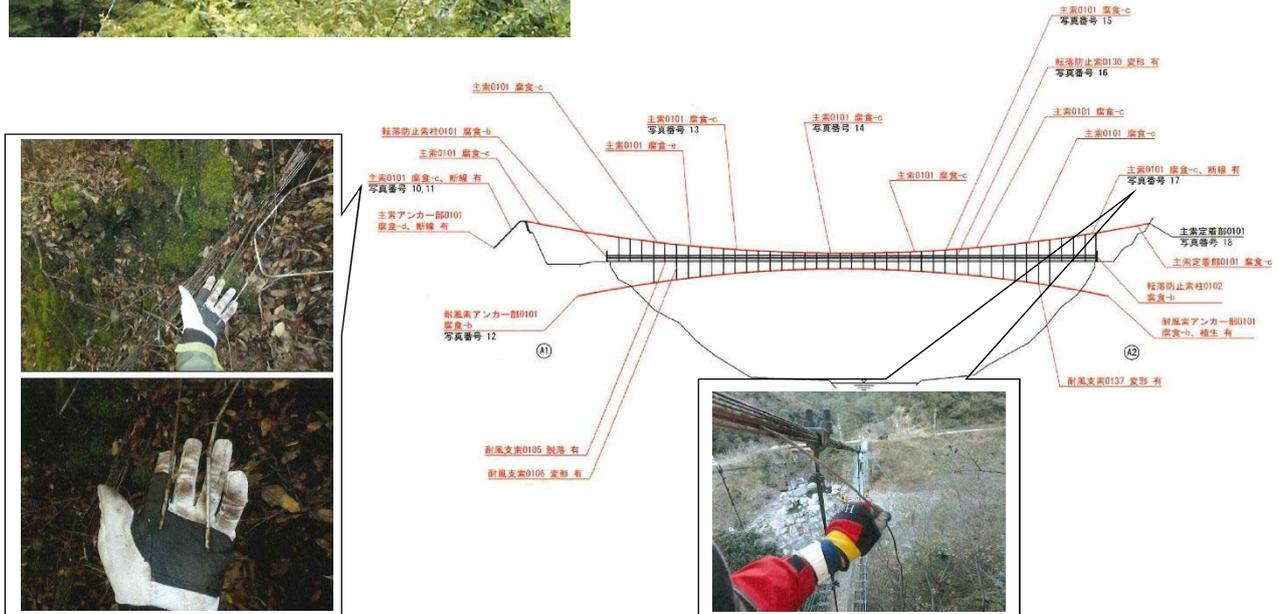
である。

次頁より、主な損傷事例を示す。

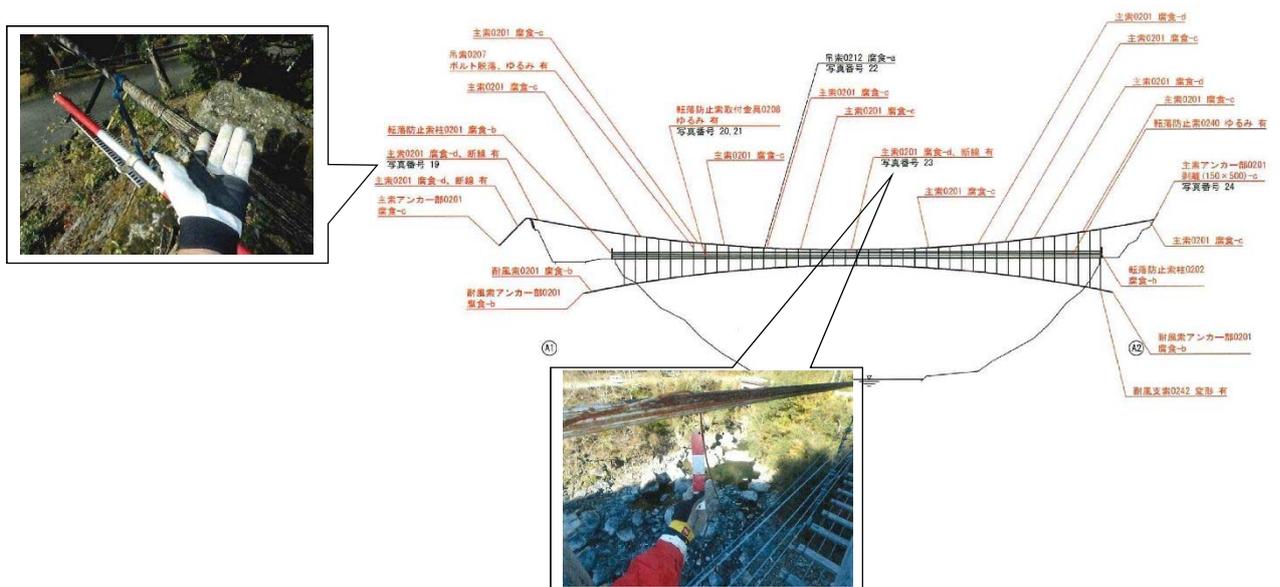
【大野出合橋】：奈良県十津川村



大野出合橋 上流側側面図



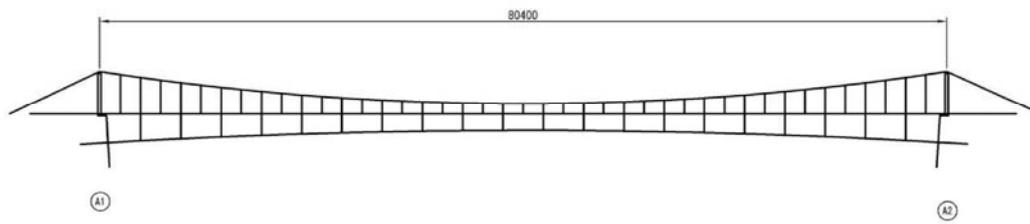
大野出合橋 下流側側面図



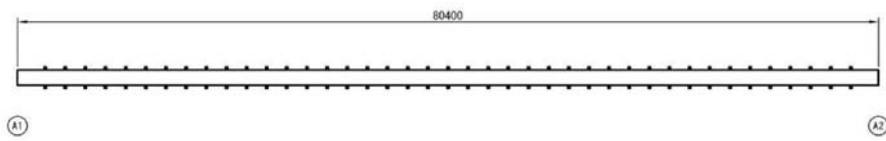
【川根橋】：和歌山県田辺市



側面図



平面図



断面図

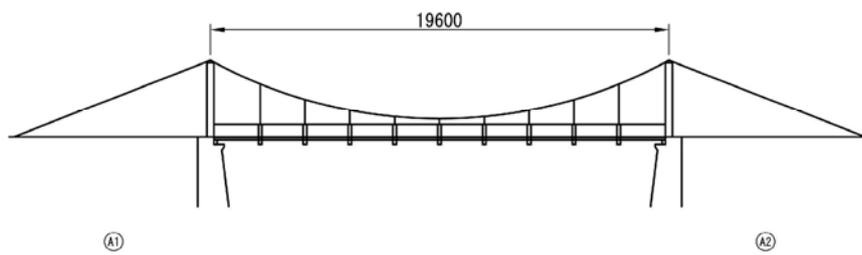


耐風索の破線

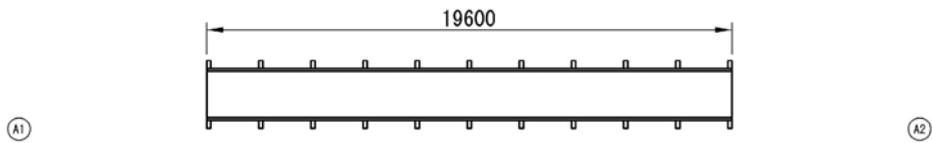
【松平橋】：和歌山県田辺市



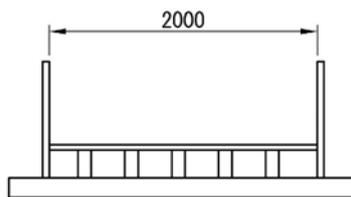
側面図



平面図



断面図

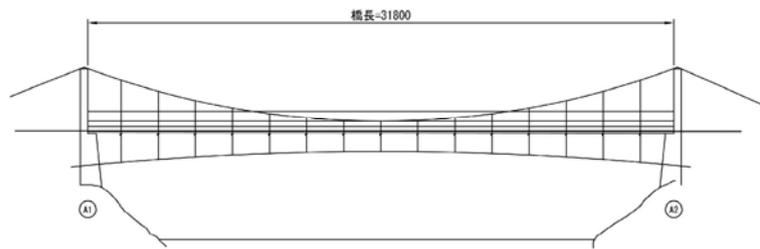


主ケーブルの腐食

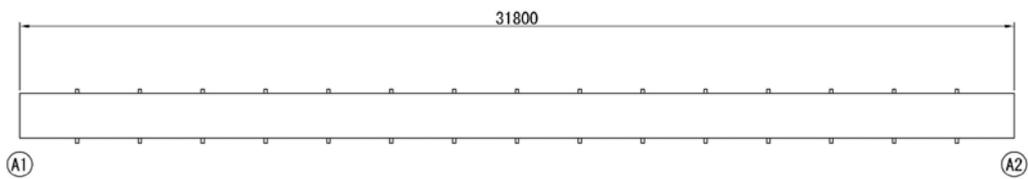
【桧和瀬橋】：和歌山県田辺市



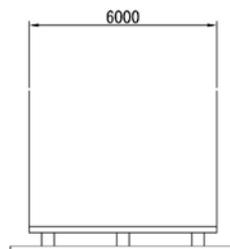
側面図



平面図



断面図



吊材の腐食，変形・欠損



耐風支索の破断

2.2.2 斜張橋

管内の斜張橋は、全 8 橋架橋されており、現在も供用されている。その架橋状況は、図 2.6 に示すとおりである。8 橋の内訳は、和歌山県 3 橋、京都府 4 橋、奈良県 1 橋である。

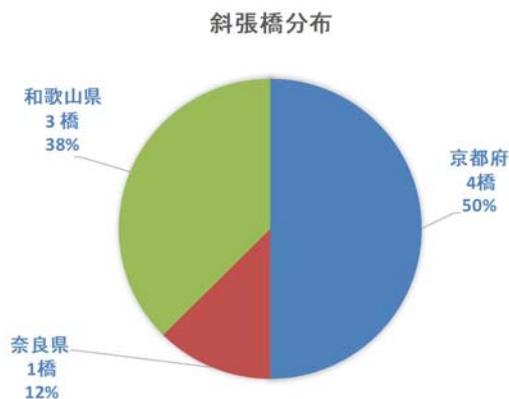


図 2.6 管内斜張橋分布図

図 2.7 には、これら 8 橋の供用年数を示す。

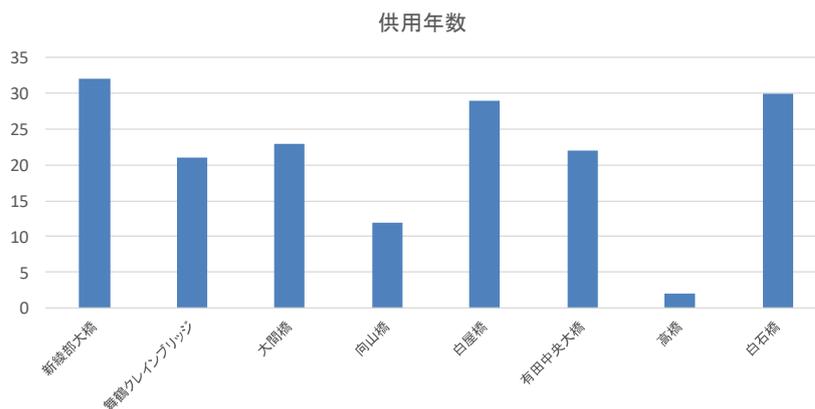


図 2.7 管内斜張橋供用年数

* 便宜上、2020 年を基準として算定

上図から確認できるように、その大半は比較的架橋年次は新しい。なお、供用年数毎の分布は図 2.8 に示すとおりである。

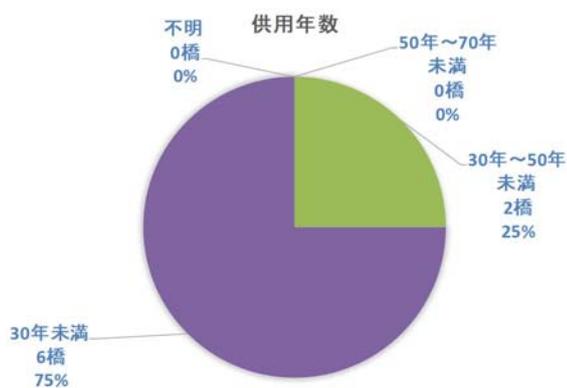


図 2.8 供用年数毎の分布図

図 2.9 には、対象橋梁の橋梁規模を示す。

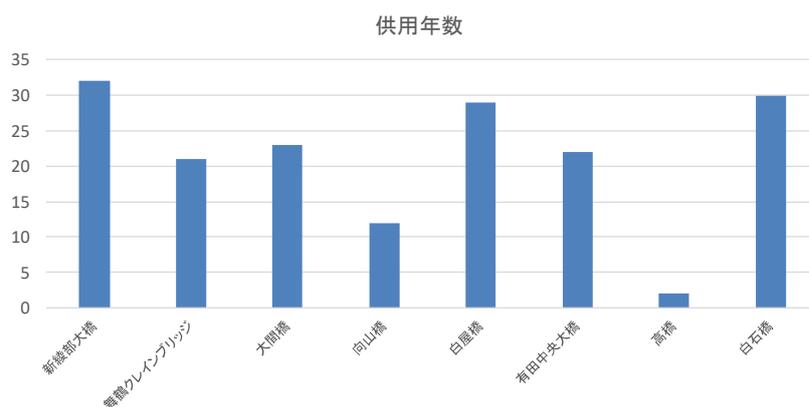


図 2.9 橋梁規模

最も橋長が長い橋梁は、舞鶴クライnbrIDGE (L=735m) である。

これら 8 橋の斜張橋に対して実施されている橋梁点検結果をもとに、その損傷判定区分及び損傷内容を整理した。

まず、損傷判定区分 (I~IV) については、図 2.10 に示すとおりである。

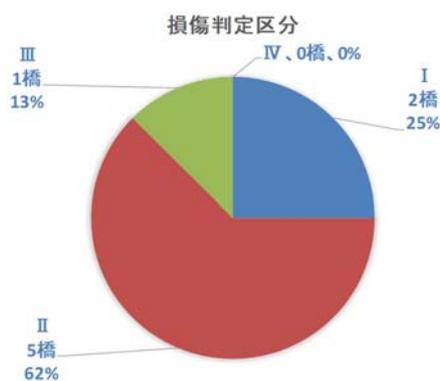


図 2.10 損傷判定区分

この図から、損傷判定I及びIIがほとんどであり、何らかの対策が必要とされるIII及びIVの損傷が確認されている橋梁は 1 橋のみである。

なお、損傷状況は巻末の資料に示すとおりで、本研究の着目点である“ケーブル”に係る損傷をピックアップしている。

主な損傷は、

■斜材の定着部の腐食：緑ハッチ

である。

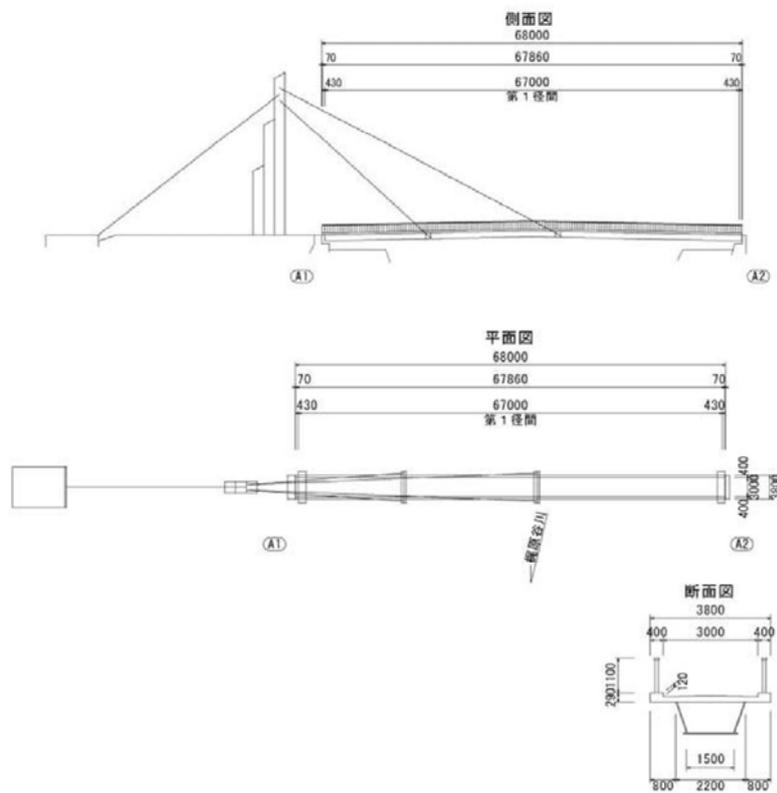
次頁より、主な損傷事例を示す。

【白石橋】：和歌山県白浜町

起点



終点



定着具の異常

2.3 今後の課題

来年度は、本研究の問いである吊り形式特殊橋の維持管理支援法についての議論していく予定であり、具体的には下記のとおりである。

■ 実態が整理されていない吊り形式橋梁の損傷と構造形式の関連性を明らかにし、損傷実態に沿ったモニタリング法の検討を研究方針に反映。

■ 点検を補完できるモニタリングの条件検討のために、当面は優先度の高い中小規模の吊り形式の橋梁を対象に候補を選別中である。

上記内容に対し、

- 橋梁定期点検調書の精査を継続
- 劣化特性の精査や橋梁の項目別分類による重点着目箇所などを継続検討
 - ・ ケーブルや定着の仕様・構造
 - ・ 径間形式、桁形式、
 - ・ 支承形式
 - ・ ハンガー形式
 - ・ 寸法関係（塔、桁、幅員、など諸々組み合わせ）

等に対して整理していく予定である。

第3章 ケーブル構造の特殊橋モニタリングの実態調査

3.1 動態観測の実施目的

我が国は台風、地震の常襲地域に位置しており、本州四国連絡橋は、諸外国に比べ高い設計外力で設計が行われた。長大橋に作用する外力及び橋体応答については、未解明な部分が多いことから、耐風および耐震設計においては、種々の仮定が設けられている。それらの仮定の妥当性を検証するために、明石海峡大橋を除く長大橋に対しては起振機を用いた振動実験が行われ、設計上の仮定の一部についてはその妥当性の検証が行われている。しかし、明石海峡大橋においては、その橋梁規模が非常に大きなものとなったため、起振機を用いた振動実験は実施されていない。

本州四国連絡橋においては、この様な設計上の各種仮定の妥当性の検証や、大規模外力作用時の橋体の安全性を評価するために、ほとんどの橋梁に風速計および地震計が設置されている。また、主要な橋梁においては動態観測システムが設置され、台風時および地震時の実橋観測が実施されてきた。

設計検証の結果、これまでに行われてきた動態観測及び得られた観測データの分析等による設計検証の結果、観測された外力は設計想定の半分程度の大きさであるが、建設時の設計法は安全側の結果が得られる方法であることが確認された。これまでに行われた設計検証については、3-3にその概要を示す。

本州四国連絡橋の3ルート completion から約20年が経過し、その間、計測機器の更新が行われるとともに、上記の設計検証をはじめ、これまでに蓄積された動態観測データのとりまとめが行われ、長期的な動態観測の実施方針について検討が行われた。その結果、今後の観測の目的は、さらに大きな大規模外力を受けた場合の自然風、地震動特性及び橋体挙動の観測と観測結果に基づく橋体の安全性評価とし、代表橋梁を選定して観測を継続することとされた。

3.2 動態観測設備

現在、本州四国連絡橋において実施されている長大橋の動態観測の機器設置状況については、表 3.1 および図 3.1 に示すとおりである。

表 3.1 動態観測の機器設置状況

自然風・地震動の観測		
橋名	自然風観測	地震動観測
明石海峡大橋	中央径間中央部 5 箇所	4A (GL-24m)
大鳴門橋		5A (GL-12m)
多々羅大橋	中央径間中央部 (含、雨量計)	
橋体挙動の観測		
橋名	構造等の主な特徴と観測内容	
明石海峡大橋	トラス吊橋の代表橋梁：2P 主塔基礎，2P 主塔および補剛桁中央・3/4 点での橋体挙動観測	
大鳴門橋	南海地震観測の代表橋梁：3P 主塔基礎，3P 主塔および補剛桁 3/4 点での橋体挙動観測	
多々羅大橋	斜張橋の代表橋梁：C22N ケーブル，C43N ケーブルおよび桁中央での橋体挙動観測	

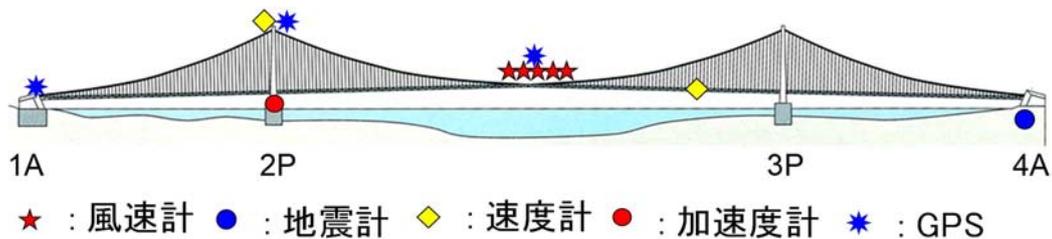
収録データ

(1) 常時観測データ

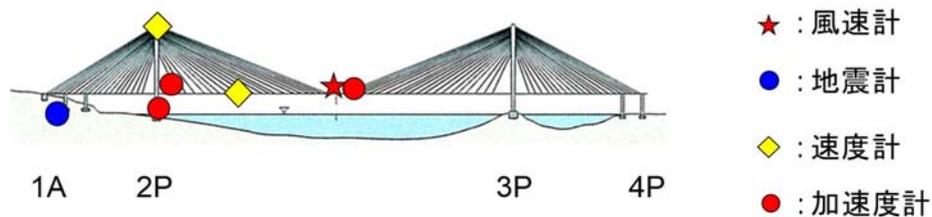
毎正時における観測データ

(2) 強風時，地震時データ

- 1) 強風検出トリガ値： 明石海峡大橋：20 m/s
多々羅大橋：5 m/s
- 2) 地震検出トリガ値：鉛直成分について 2 gal



(a) 明石海峡大橋



(b) 多々羅大橋

図 3.1 動態観測の機器設置状況（明石海峡大橋及び多々羅大橋）

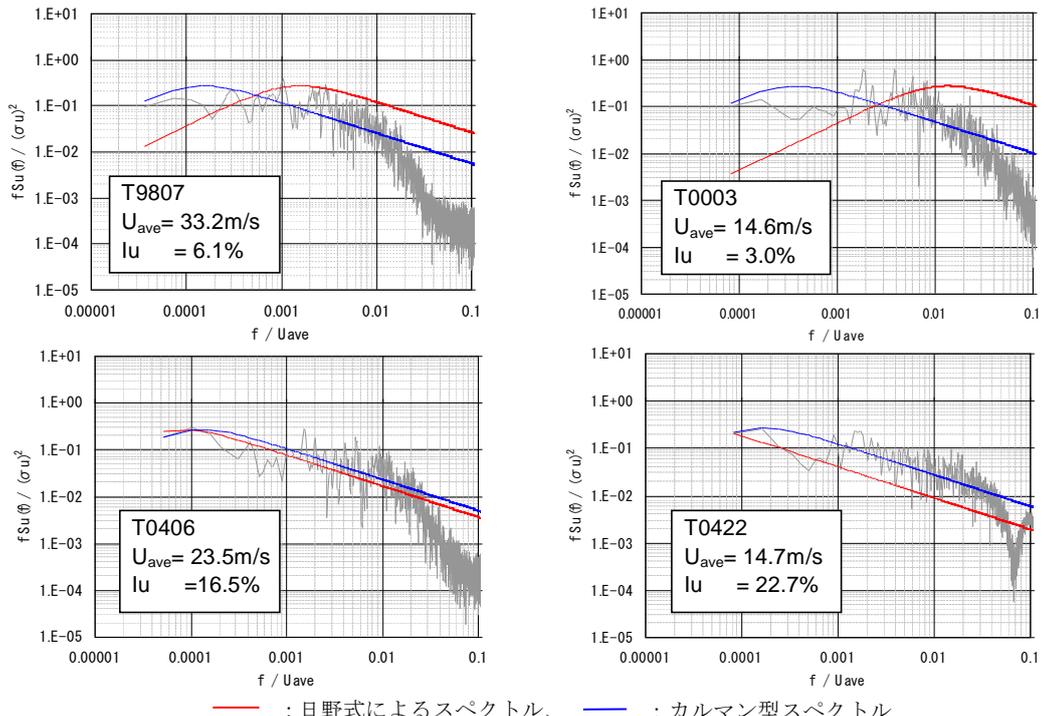


図 3.2 台風通過時の風データのパワースペクトル

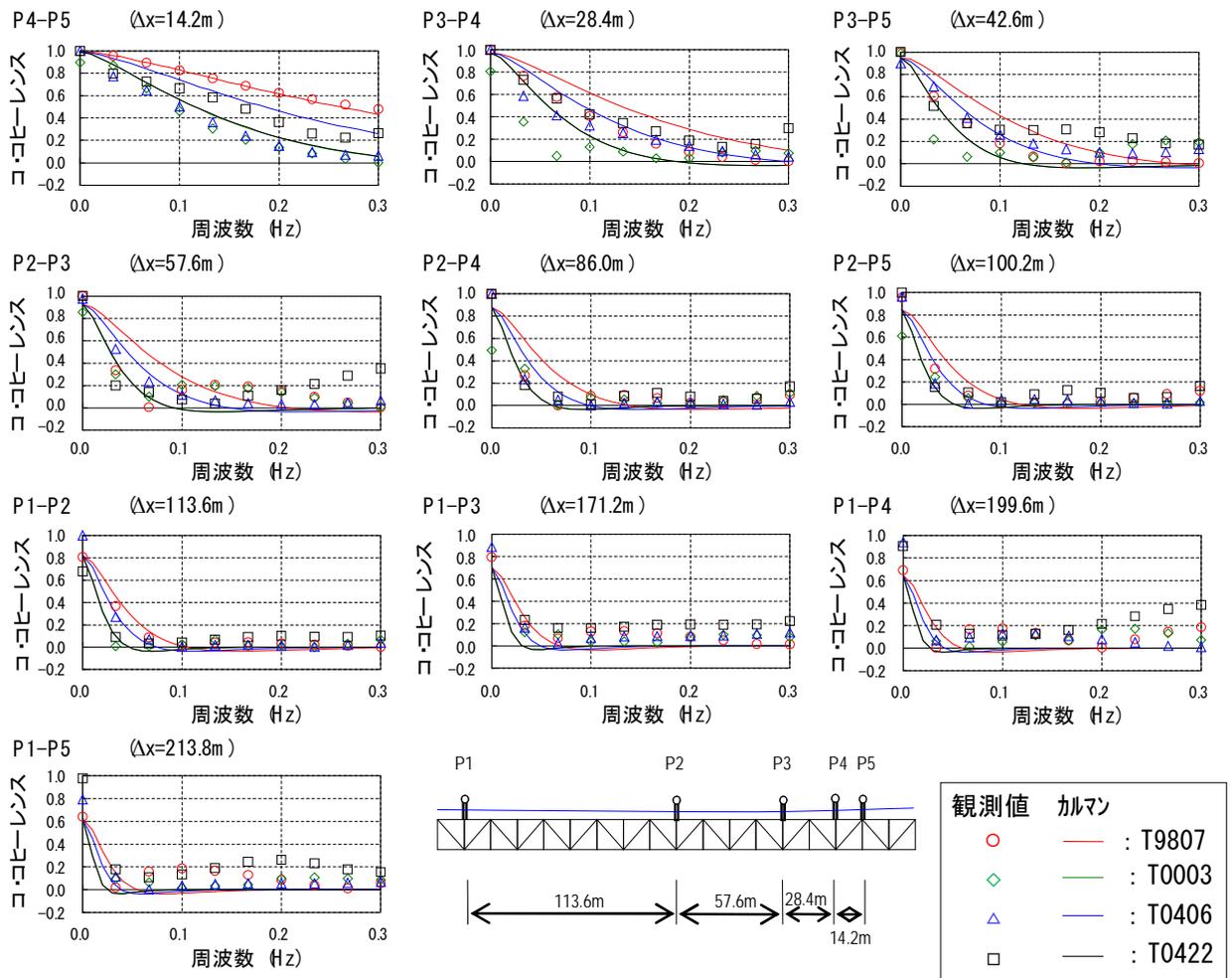


図 3.3 台風通過時の風データに対する空間相関の分析結果

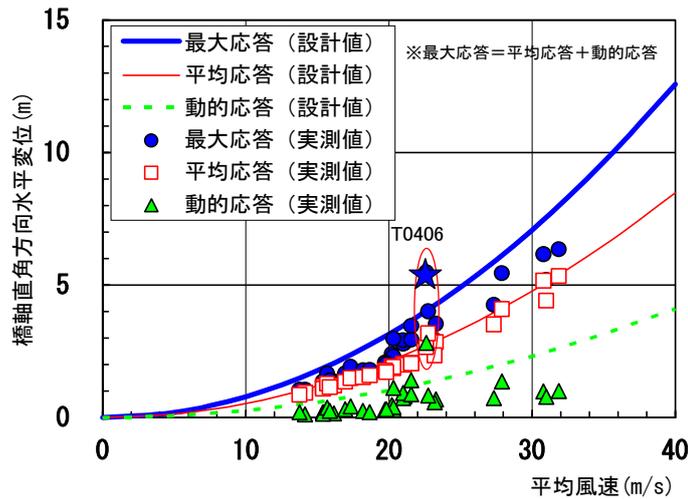


図 3.4 風速と支間中央における変位の関係

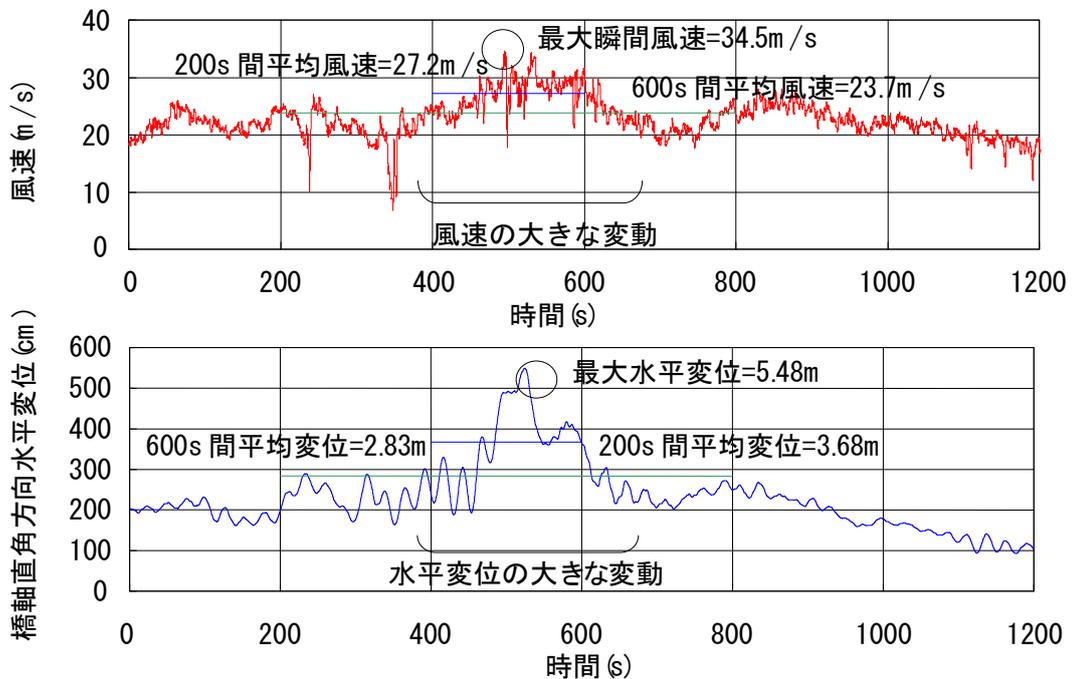


図 3.5 台風 0406 通過時の風速と支間中央における変位の時刻歴波形

3.3 設計検証に関わる検討結果

3.3.1 風時の明石海峡大橋の挙動に関する検討

台風時の特徴的な自然風記録の分析を行った。自然風の気流のパワースペクトルは、明石海峡大橋耐風設計要領)に規定された日野式によるスペクトルとカルマン型スペクトルに概ね一致することを確認した。ただし、気流の乱れ強さが小さい場合においては、乱れ強さを 10%と仮定している日野式は実測値と整合しない結果となった(図 3.2)。

また、自然風の空間相関は、明石海峡大橋耐風設計要領に規定されたダベンポート式(指数関数式)より、カルマン型の空間相関関数と概ね整合する結果となった(図 3.3 参照)。この

ため、明石海峡大橋のような長周期構造物のガスト応答において支配的となる低振動数領域での空間相関は安全側の仮定となっていると考えられる。

補剛桁の強風時の応答について、平均風速と補剛桁橋軸直角方向水平変位の関係を分析した。補剛桁の平均応答は設計値とほぼ一致し、最大応答（平均応答+動的応答）は設計値よりも小さい傾向となることが明らかとなった（図 3.4 参照）。この結果は、ガスト応答を見込んだ風荷重の補正係数が、安全側の設定となっている可能性を示唆するものである。また、風速変動が大きい場合に、設計値を超える応答が生じる場合があったが、短時間の風速変動による応答が影響していることが明らかとなり、設計上は問題ないことを確認した。

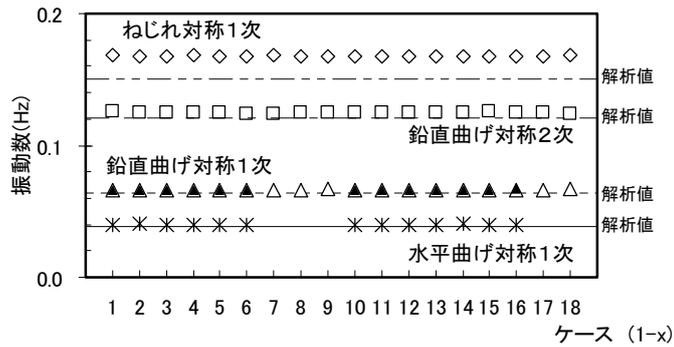


図 3.6 補剛桁の固有振動数

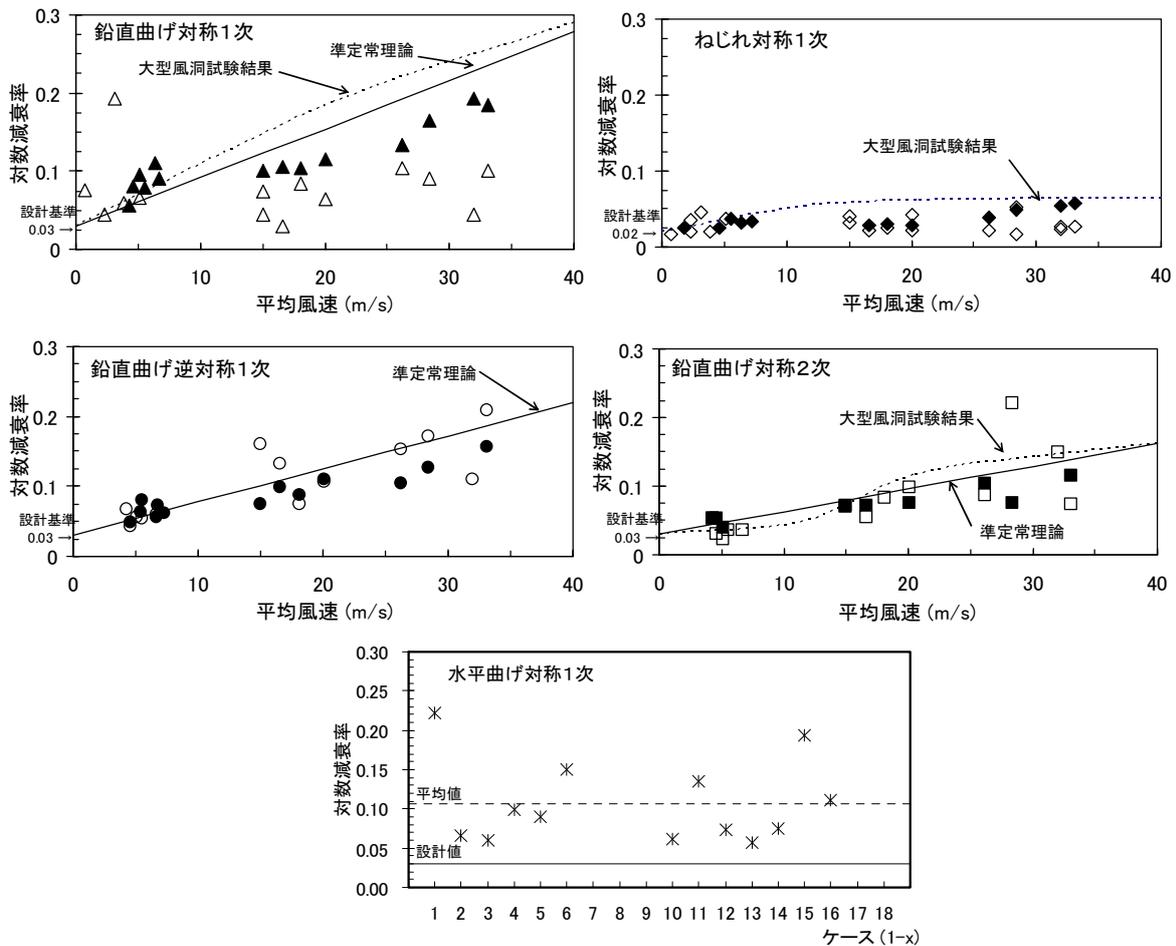


図 3.7 風速と対数減衰率の関係

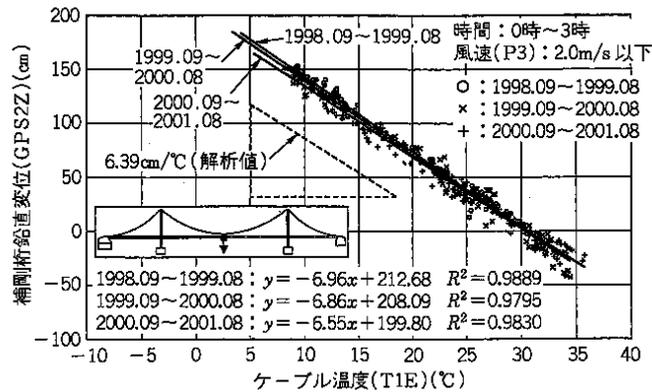


図 3.8 ケーブル温度と桁鉛直変位の相関

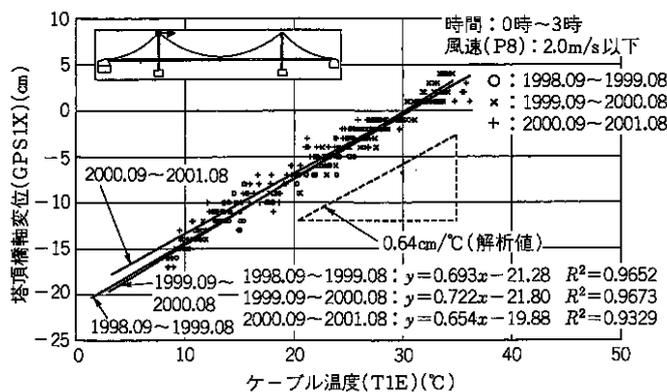


図 3.9 ケーブル温度と塔頂橋軸変位の相関

明石海峡大橋補剛桁の動的特性について、常時微動データ及び強風時データの分析 (RD(Random decrement)法と ERA (Eigensystem realization algorithm) 法) を行った。補剛桁の固有振動数は、設計値とほぼ整合する結果となったが、ねじれモードの固有振動数は若干大きめの値であった (図 3.6)。構造減衰も、設計値とほぼ整合する結果となったが、水平モードの構造減衰は設計値に比べかなり大きい可能性があることが分かった (図 3.7)。

3.3.2 明石海峡大橋の長期的な形状管理に関する検討

明石海峡大橋に設置されている GPS より得られる常時観測データを用いて長期的な形状管理についての検討を行った。補剛桁中央の鉛直変位および 2P 塔頂の橋軸方向変位とケーブル温度の観測記録を基に、両者の相関を整理したグラフを図 3.8 および図 3.9 に示す。経年的な構造系の変化はないこと、また解析結果ともよく整合していることが確認された。なお、2018 年までの常時観測データを用いて、同様のデータ整理が行われたが、傾向としては同様であり、経年的な構造系の変化は見られないことが確認されている。

3.3.3 地震時の多々羅大橋・来島海峡大橋の挙動に関する検討

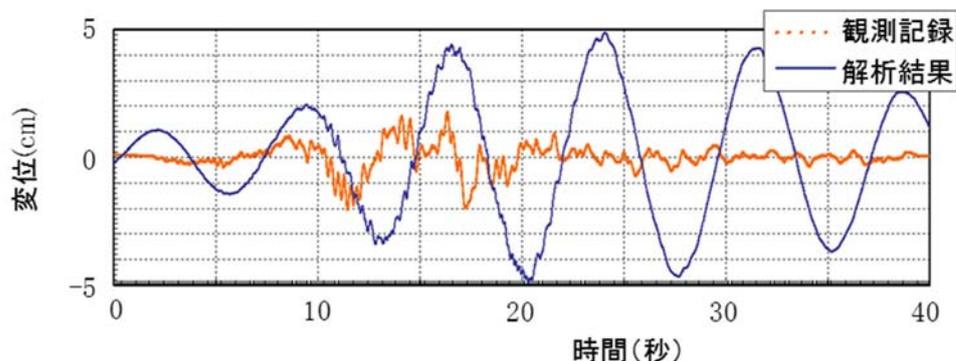
2001 年 3 月 24 日に発生した芸予地震時の多々羅大橋と来島海峡大橋に対する検討を行った。多々羅大橋においては、上下部構造の動態観測記録を、観測地震動を用いた地震応答解析によりシミュレーションできるかの検討を行った。

多々羅大橋下部構造の検討では、支持地盤の剛性を、地盤内の割れ目や部分的な弱層の影響を考慮して低減すると共に、地盤の非線形性（地盤剛性のひずみ依存性や基礎の浮き上がり）を考慮した解析を行った。この結果、塔基礎の加速度応答の観測記録を概ねシミュレートすることができた。

多々羅大橋上部構造の検討では、端支点の橋軸方向の支承条件を可動から固定に変更すると共に、ケーブルに節点を設けケーブル重量を接点に振り分けることで、ケーブル振動を考慮できる解析モデルで検討を行った。端支点の支承条件のモデル化の変更は、地震後の点検で支承の移動形跡が確認されなかったことから、摩擦係数の影響で滑り面の摩擦が切れなかったものと推測して行ったものである。解析の結果、主桁の橋軸方向の応答を精度よくシミュレートすることができた（図 3.10 参照）。塔頂変位波形のシミュレート結果と実測結果の比較を図 3.11 に示す。塔頂変位についても精度よく解析できることが分かる。

図 3.12 の来島海峡大橋の検討では、観測地震動を用いた地震応答解析により、3 吊橋のセンタースティの発生張力を検討した来島海峡大橋のセンタースティ（図 3.13 参照）には、設計地震動の 60%の地震動でセンタースティを破断させるためのロッドが設けられている。芸予地震においては、3 吊橋のうち、第一大橋のみでセンタースティロッドが破断し、第二大橋と第三大橋のセンタースティロッドは破断しなかった。解析でも、センタースティロッドの破断した第一大橋のセンタースティ張力のみが、ロッドの破断強度を超過する結果となった（図 3.14 参照）。

基本モデル



変更モデル

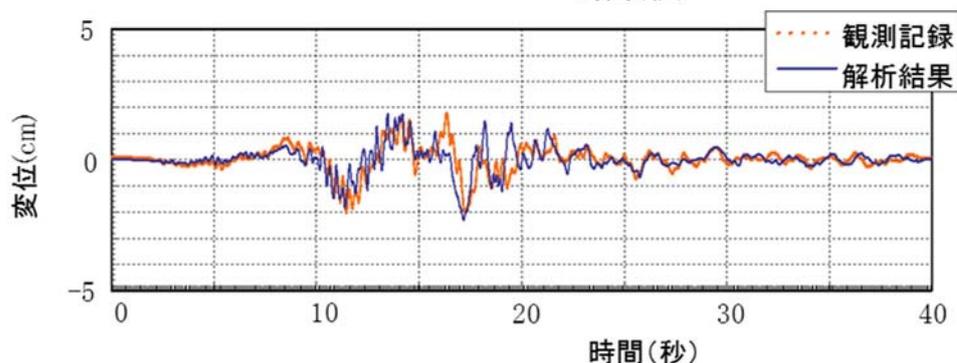
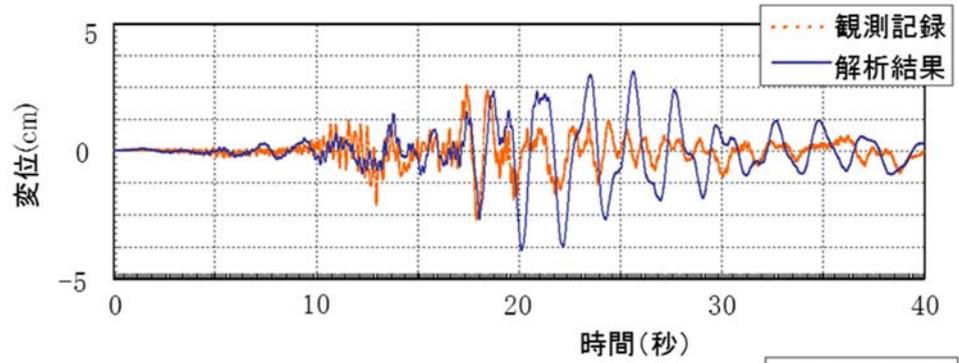


図 3.10 主桁変位波形の比較（多々羅大橋；橋軸方向）

基本モデル



変更モデル

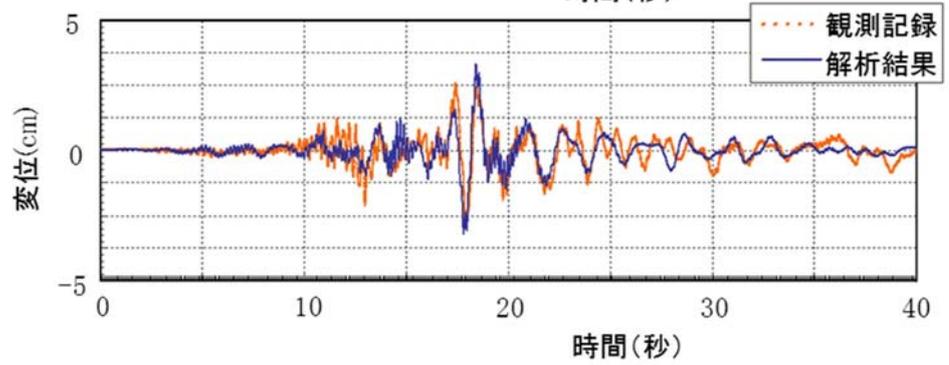


図 3.11 塔頂変位波形の比較(多々羅大橋; 橋軸直角方向)

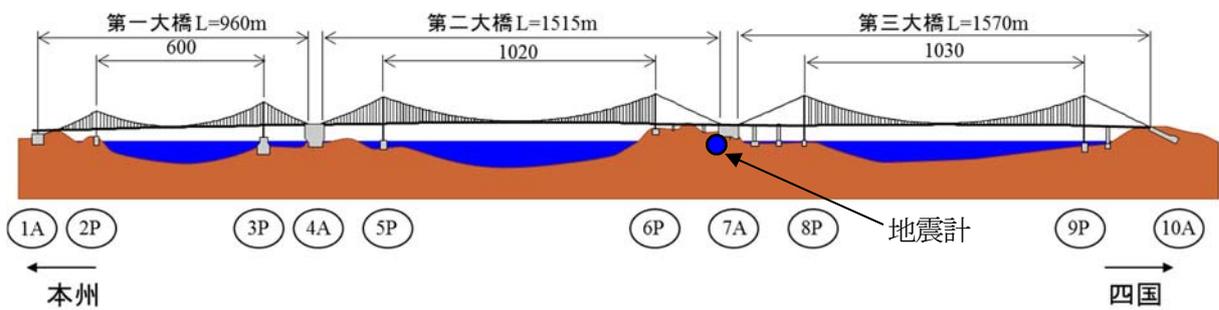


図 3.12 来島海峡大橋に設置された地震計の位置

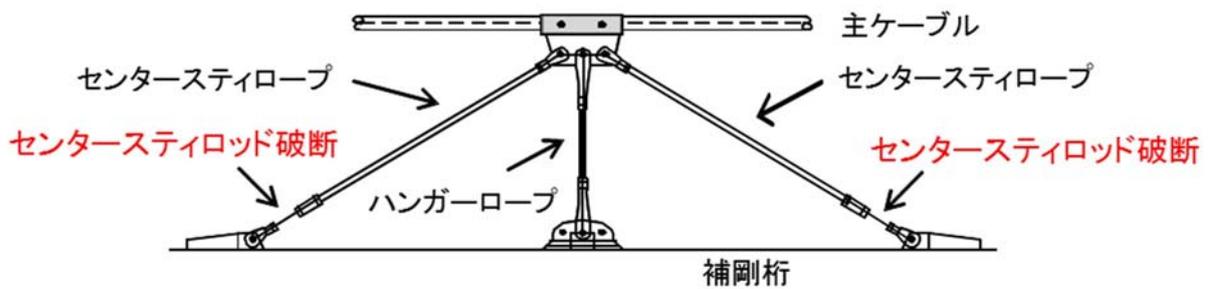
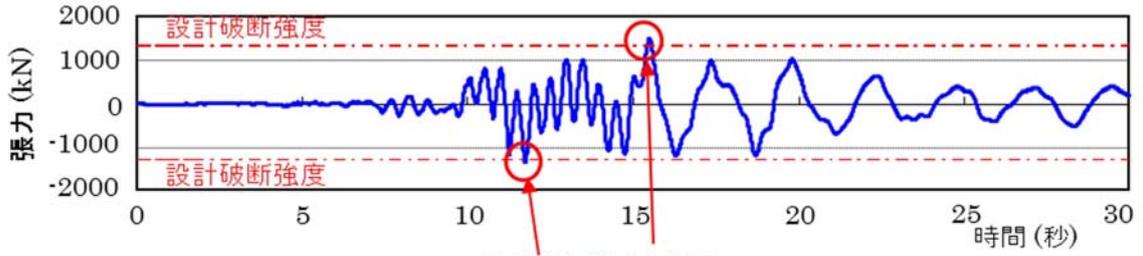
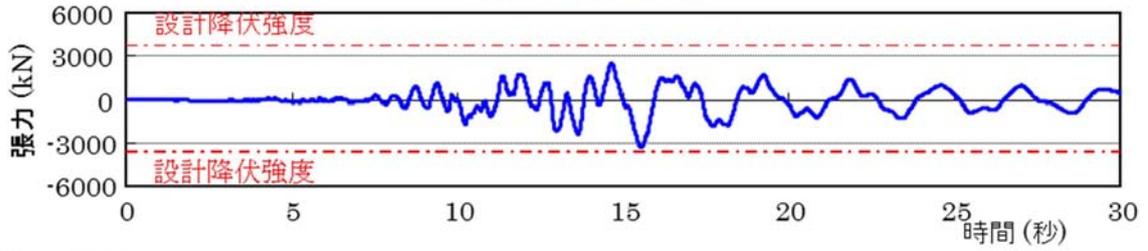


図 3.13 センターステイ構造

第一大橋



第二大橋



第三大橋

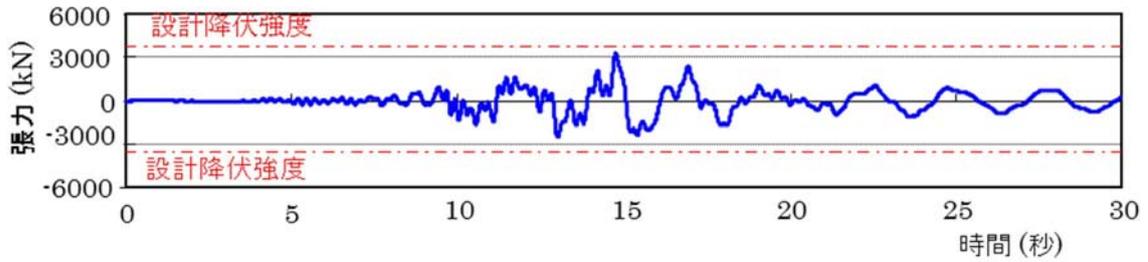


図 3.14 解析によるセンターステイ張力の時刻歴波形

3.4 諸外国の吊り形式橋梁のモニタリング例

諸外国の吊り構造の長大橋についても構造ヘルスマニタリングによりは、風や地震に動態観測が主な目的でセンサの導入やモニタリング計画が行われており、目視点検や維持管理の目的に設置されているケースは稀である。例えば、香港の Tsing Ma 橋、Ting Kau 橋、Stone Cutters 橋には橋梁健全度モニタリングを目指し大量のセンサを設置しているが、主に主塔と主桁の動態に着目しており、破壊モードの主たる部材であるケーブルの振動モニタリングは少ない。一方で、研究目的で試験的にモニタリングシステムを構築し、長期モニタリングを行っている場合はケーブル振動までを対象とするケースが散見されている。例えば、オーストラリアの New South Wales 州の Great Western Highway に架設されている斜張橋（A 橋と称する）に長期ヘルスマニタリング目的の各種のセンサが設置されている。関連して、A 橋の長期モニタリングデータにアクセスできるように許可を得ており、次年度以降のデータ分析のためにも利用する予定である。また、香港の長大橋のモニタリングデータについて担当者と協議中であり、まずは Ting Kau 橋のデータの一部を用いている。

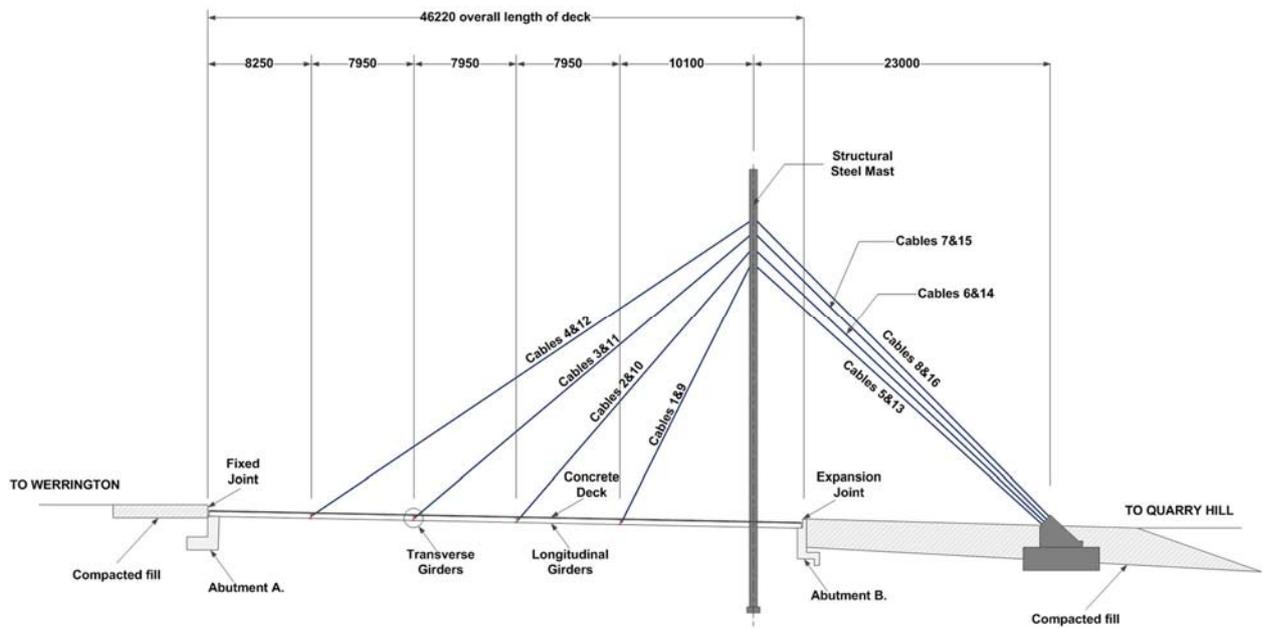
3.4.1 A 橋（小規模斜張橋、オーストラリア）の長期モニタリングシステム

オーストラリアの New South Wales 州の Great Western Highway に架設されている斜張橋 A 橋のモニタリングシステムを紹介する。対象橋は径間張 46.2m、幅員 5.5m、主塔の高さ 33m の斜張橋である（図 3.15）。

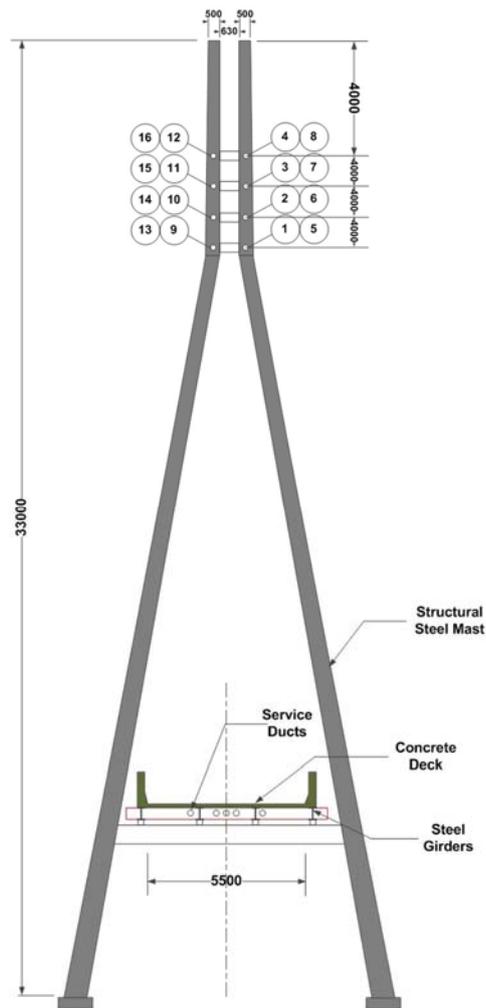


(a) 橋梁の全景

(次項に継続)



(b) 側面図



(c) 正面図

図 3.15 モニタリング対象の小規模斜張橋

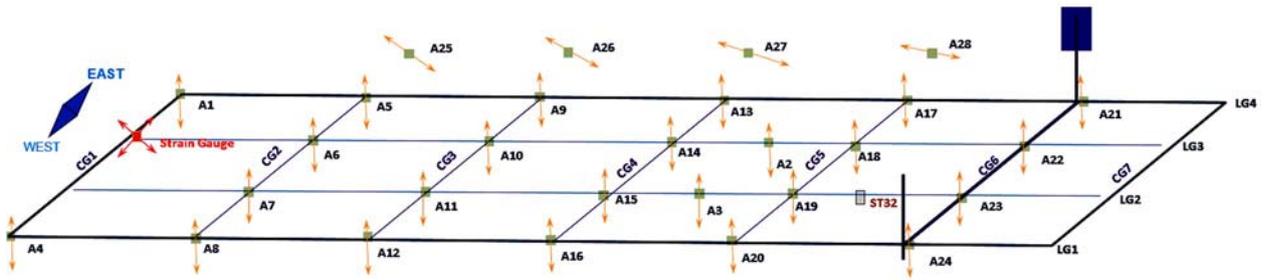


図 3.16 センサ配置図

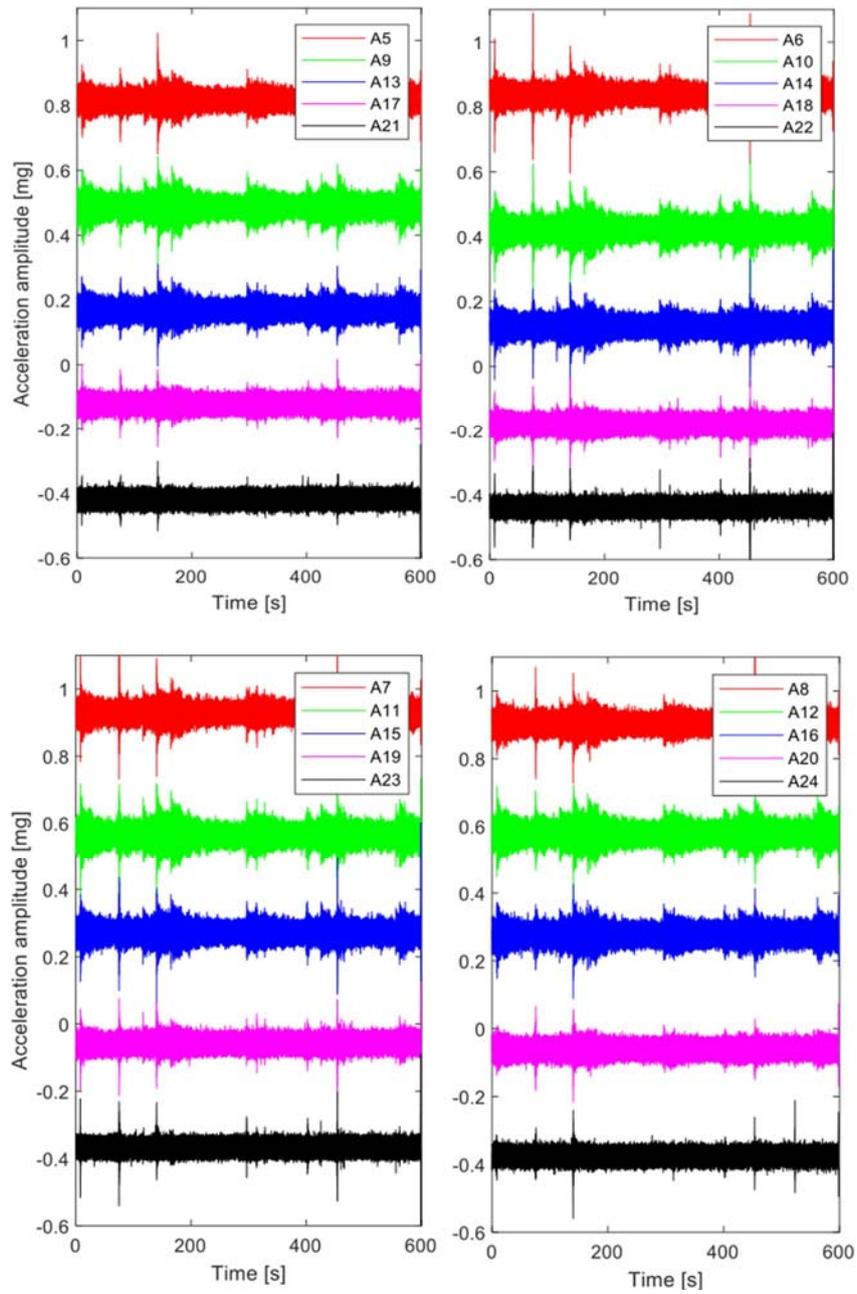


図 3.17 桁の加速度応答

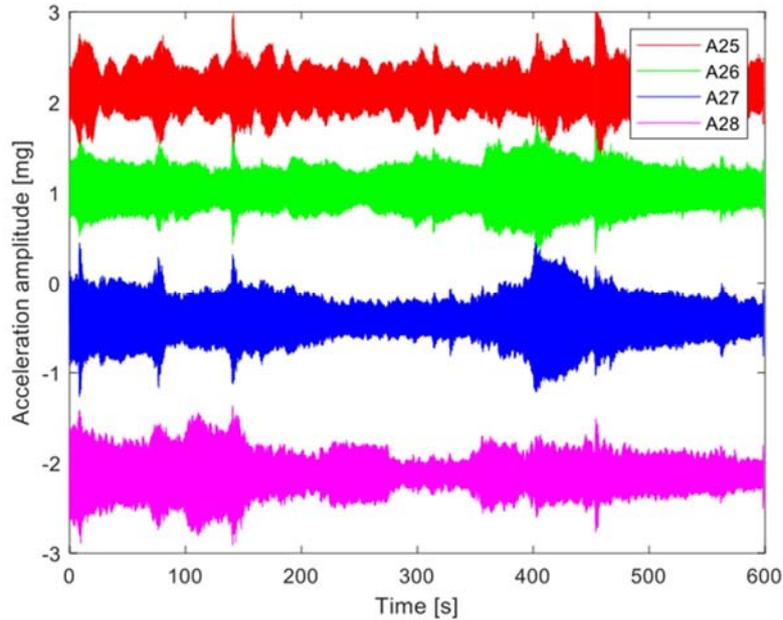


図 3.18 ケーブルの加速度応答

長期モニタリング用のセンサ配置を図 3.16 に示す。振動計測用の 1 軸加速度センサを 28 個，BWIM 用の防水ひずみセンサ 1 セット，サーモセンサ 1 個を設置している。特にケーブル振動を計測するために，ケーブル No.9 から No.12 の合計 4 つの主ケーブル（図 3.15(b), (c)参照）に加速度計を設置している（図 3.15(a)と図 3.16 の A25~A28）。

計測は，10 分間隔で 24 時間計測を行っており，毎時 144 ファイル（24 時間×6 ファイル/時），10 分間で 360000 サンプル（10 分×60 秒×600Hz）が生成され，4G 移動通信システムを介してデータベースに転送されている。

主桁とケーブルの 10 分間の計測加速度の例をそれぞれ図 3.17 と図 3.18 に示す。また 2016 年 11 月 2 日午前 10 時から 24 時間の温度とひずみの時系列をそれぞれ図 3.19 と図 3.20 に示す。図 3.19 から日中の気温が 18 度程度変動していることが分かる。また，図 3.20 から交通量の変化を把握できる。すなわち午前 8 時～午後 8 時に比べ深夜の交通量が少ないことが分かる。このような温度や交通量の変動が桁およびケーブル振動に影響を及ぼす可能性が考えられる。特に，ケーブルも温度の変化により伸び縮みが生じ，振動特性の変化をもたらすことが考えられる。またそれによって張力の変化にもつながる。

交通の影響を示す一例を図 3.21 に示す。図 3.21(a)に夜間の交通量がない時間帯の常時微動を，図 3.21(c)にはそのときのひずみの時系列を表す。ひずみの時系列から分かるように，車両の通行がないことが分かる。一方で，図 3.21(b)は日中の車両が通過している時間帯の常時振動を，図 3.21(d)にはそのときのひずみの時系列を表す。図 3.21(b)と図 3.21(d)から分かるように，車両通過（ひずみのピークが生じるタイミング）によって桁の加速度の過度応答が確認されている。一般的に振動モニタリングによる振動特性の推定には，定常応答の振動特性の推定を目指しており，過度応答が多く含まれることにより橋梁固有の振動特性からばらつく振動推定になる可能性がある。

以上のように，本小規模の斜張橋の長期モニタリングデータは，吊り形式の特殊橋のモニタリング手法の検討において大変重要なデータを提供しており，今後の季節変動の吊り形式橋梁の挙

動に及ぼす影響やその季節変動の除去による正規化モニタリングデータを用いた異常検知に活かせる。

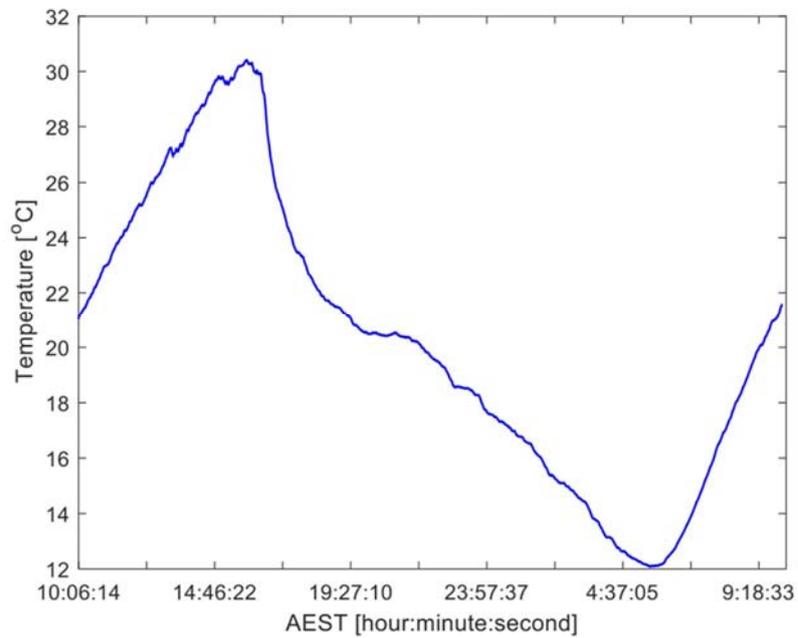


図 3.19 24 時間の温度の時系列 (AEST:オーストラリア標準時)

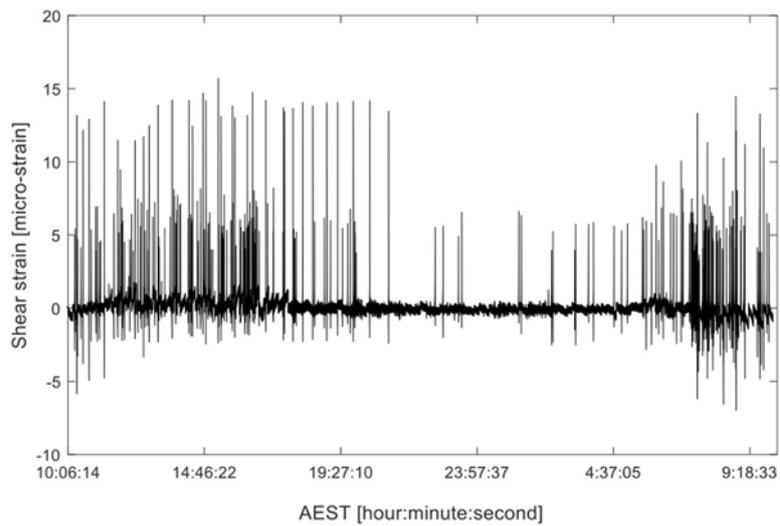


図 3.20 24 時間のひずみの時系列 (AEST:オーストラリア標準時)

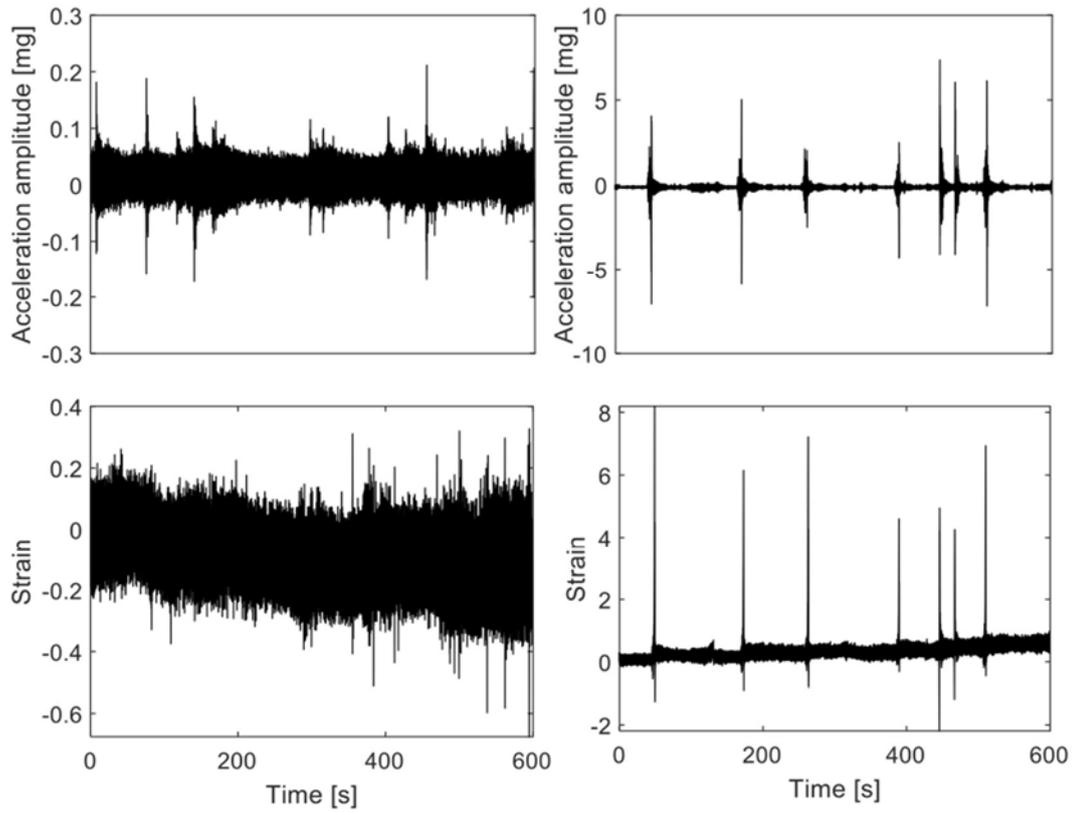


図 3.21 10 分間の加速度とひずみの時系列 : (a) 交通量がない時間帯の常時微動 ; (b) 日中の車両が通過している時間帯の常時振動 ; (c) 交通量がない時間帯のひずみの時系列 ; (d) 日中の車両が通過している時間帯のひずみの時系列

桁とケーブルの振動特性を把握するための A1~A28 までの加速度センサの 1 日中の計測サンプル 144 サンプルから最大値と最小値の変動を調べた結果を図 3.22 に示す。A1~A24 までの桁の加速度に比べ、A25~A28 のケーブル振動の方のばらつきが大きい結果となった。ケーブル振動モニタリングに着目する場合、ばらつきを十分考慮した異常検知の戦略が必要であることを示唆している。

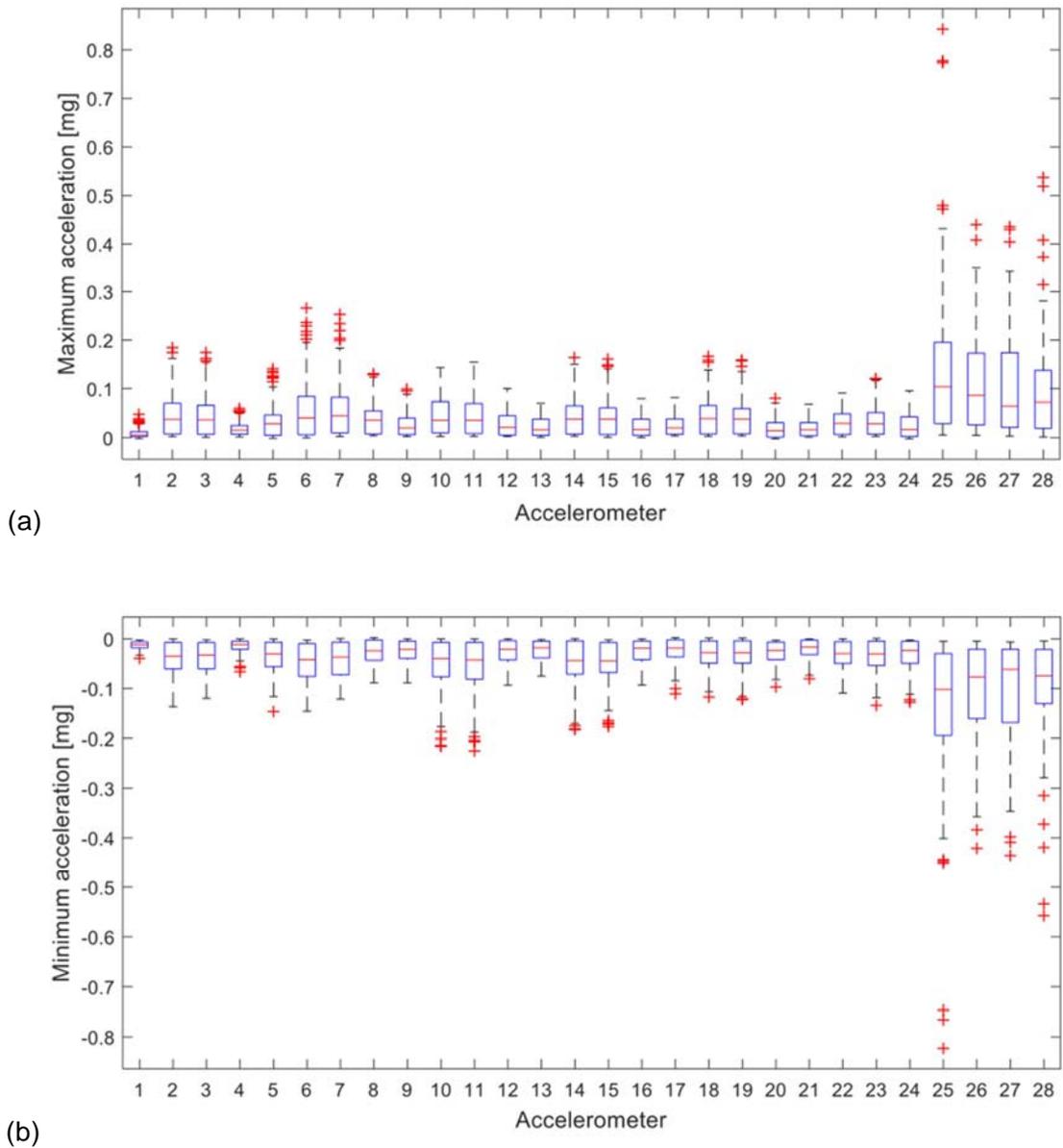


図 3.22 一日中の計測加速度（144 データセット）の最大応答と最小応答の統計値：(a) 最大値；(b) 最小値

3.4.2 T橋（3連斜張橋，香港）の長期モニタリングシステム

図 3.23 に当該橋梁の概形を示す。T 橋は全長 1177m の 3 主塔斜張橋であり、主径間長はそれぞれ 448m, 475m である。床板は 2 車線ずつ主塔の両側に離れて配置されている。それぞれの橋桁は桁端に沿った 2 主桁と 4.5m 間隔で配置された横桁で構成されており、13.5m 間隔の横桁により互いに連結されている。

中華人民共和国香港特別行政区政府の路政署（Highways Department）による長期 SHM 事業の一環として汀九橋には 1999 年の竣工以来 230 以上のセンサが設置されている（図 3.24 参照）。橋桁の橋軸方向について 8 区画にそれぞれ 3 点ずつの加速度計が配置されている。図 3.23 の赤い丸印は橋軸方向について 8 か所の加速度設置位置を示している。橋桁上の 24 個の加速度計の設置位置は図 3.23 中の赤い丸印で概略的に表されている。橋軸直角方向について両端の加速度計はそれぞれ主桁上に設置されており、鉛直方向の加速度を計測している。中央の加速度計は橋桁どうしを連結している横桁上に配置されており、橋軸直角方向の加速度を計測している。各加速度センサのサンプリング周波数は 25.6Hz である。

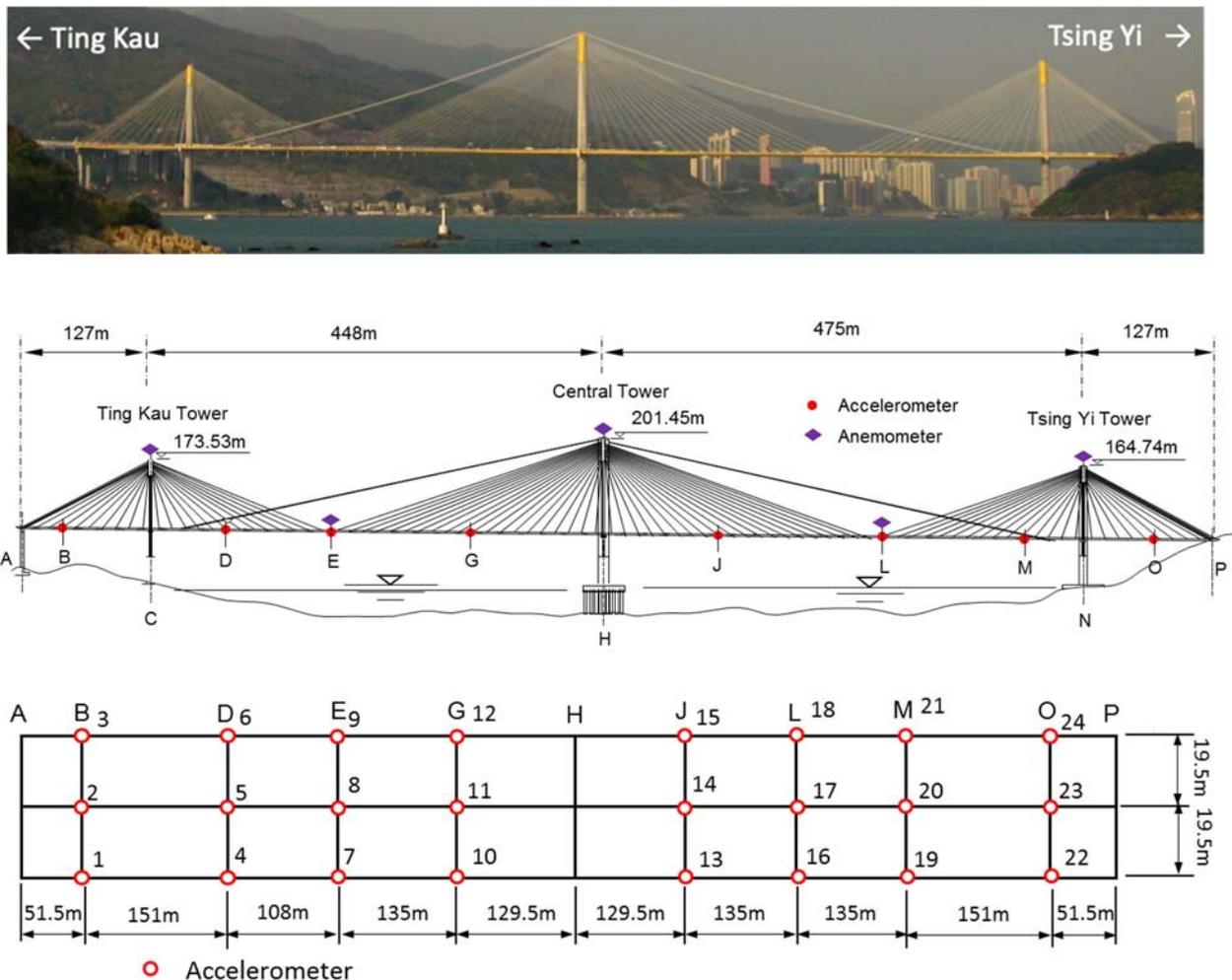


図 3.23 T 橋の諸元と加速度センサと風速計の設置図

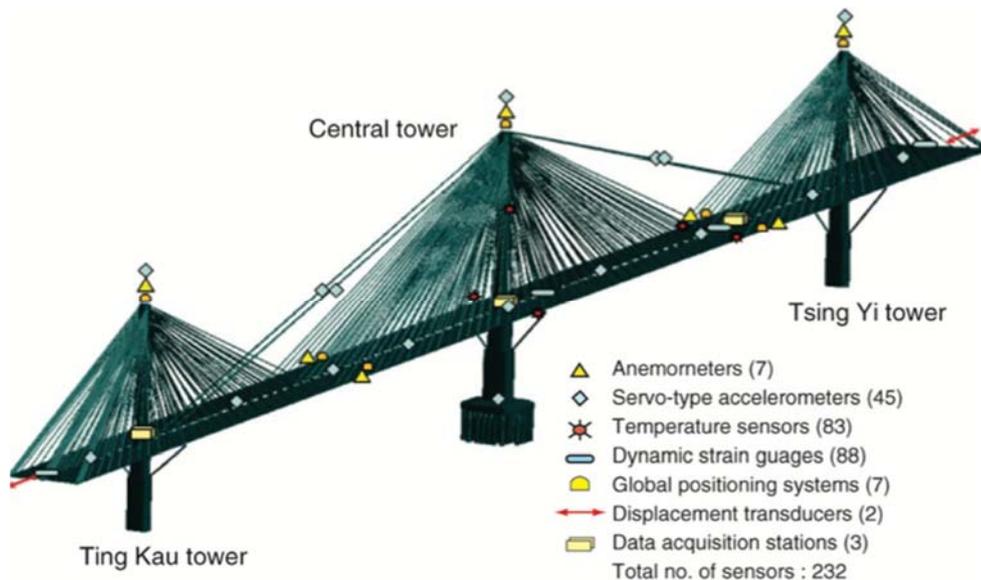


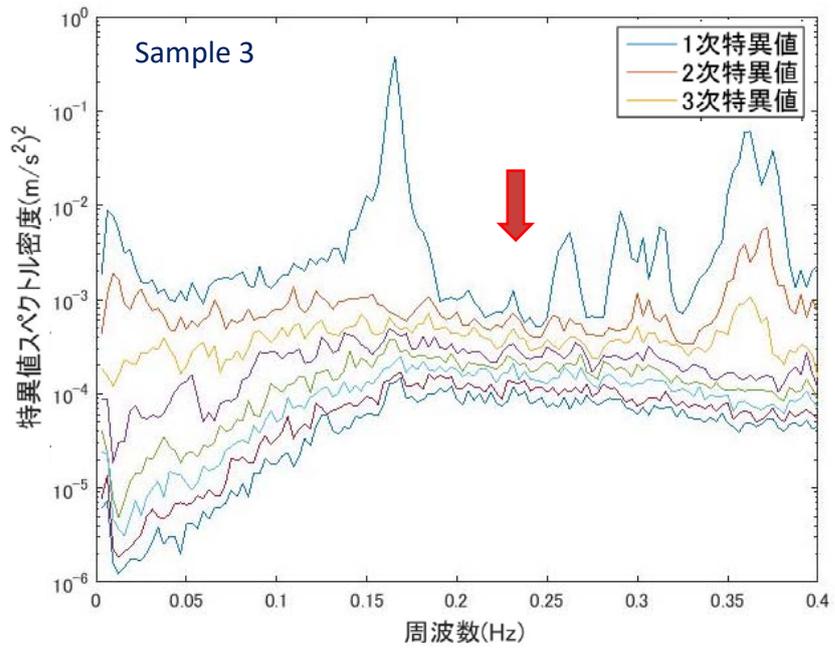
図 3.24 T 橋のモニタリング用センサの設置図

表 3.2 風速が異なるデータサンプル

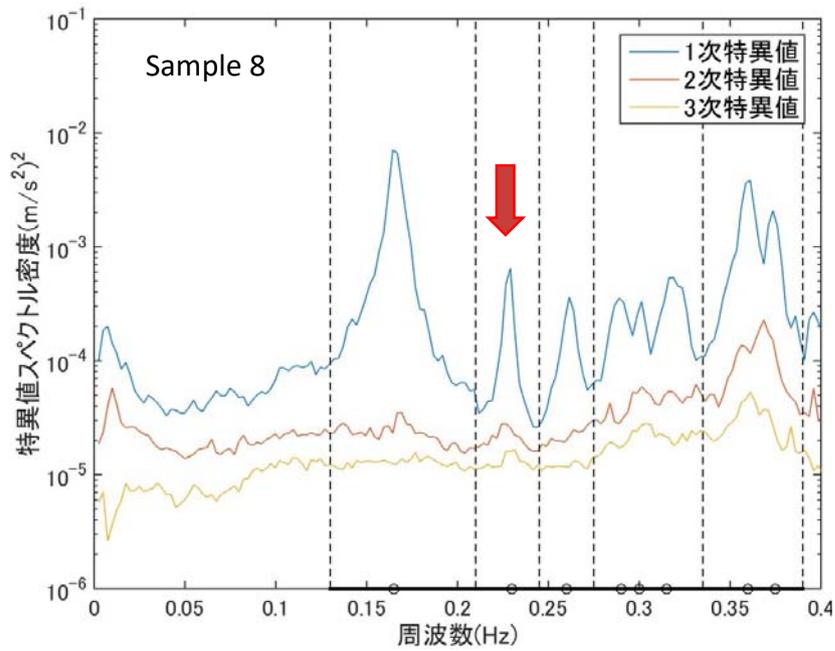
サンプル		計測期間	平均風速 (m/s)
平常時	Sample 1	1999/ 12/ 28, 15:00–16:00	2.00
	Sample 2	1999/ 02/ 18, 15:00–16:00	3.40
	Sample 3	1999/ 05/ 01, 15:00–16:00	3.34
	Sample 4	1999/ 06/ 21, 15:00–16:00	3.41
	Sample 5	1999/ 07/ 24, 15:00–16:00	6.17
	Sample 6	1999/ 08/ 12, 15:00–16:00	4.20
強風時	Sample 7	1999/ 06/ 07, 03:00–04:00	12.11
	Sample 8	1999/ 08/ 23, 02:00–03:00	15.62
	Sample 9	1999/ 09/ 16, 06:00–07:00	21.72
	Sample 10	1999/ 09/ 16, 15:00–16:00	15.91

T 橋は特定の風速により励起される振動モードがあることが報告されており、T 橋の振動特性推定に及ぼす季節変動の一例として風速の影響の検討を行った。表 3.2 に検討に用いたデータサンプルを示す。各データサンプルについて、橋桁上に配置された 24 個の一軸加速度計による観測値を対象に 4 章に説明するベイズ実働モード解析を適用する。

風速が異なる二つのデータサンプル (Sample 3 と Sample 8) の加速度の特異値スペクトル分布を図 3.25 に示す。図 3.25(a)には、平均風速 3.34m/s のとき (Sample 3) の加速度から求めた特異値スペクトル分布を示す。また、図 3.25(b)は、平均風速 15.62m/s のとき (Sample 8) の加速度から求めた特異値スペクトル分布である。図 3.25 から風速が低いとき (Sample 3) の加速度には 0.23Hz が卓越しないが、風速が高いとき (Sample 8) には 0.23Hz が卓越していることがわかる。0.23Hz のモード形状を図 3.26 に示す。図 3.26 から 0.23Hz のモード形状はねじれモードであることが分かる。風速が上がるにつれねじれモードが励起されることを意味する。すなわち対象橋梁における同定結果の環境依存性は実際の振動現象に起因していることが強く示唆された。



(a)



(b)

図 3.25 風速の異なるときの加速度の特異値スペクトル分布 : (a) 平均風速 3.34m/s のとき (Sample 3) ; (b) 平均風速 15.62m/s のとき (Sample 8)

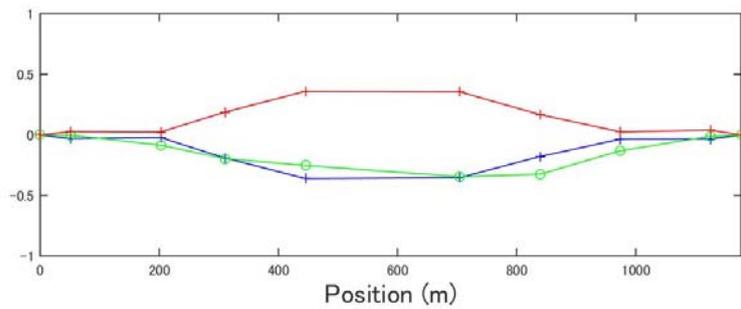


図 3.26 0.23Hz のモード形状 (ねじれモード)

第4章 長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備

4.1 概要

長大橋のモニタリングは、計測対象や計測目的によって様々であるが、センサーで構造物の挙動を測り、そのセンサー情報からモニタリング対象の特徴量を決め、特徴量からモニタリング対象橋梁の状態を評価する一連のプロセスである。特に、河川や海を渡る橋梁構造物のモニタリングでは、固定点を必要とする変位計測に制約が多く、構造物の振動を計測する加速度センサーによる振動モニタリングが注目されている。

振動計測による橋梁ヘルスマニタリグの目的は、計測振動データから橋梁の維持管理や設計へフィードバックできる構造物の状態を推定・評価することにある。特に、橋梁の振動データから橋梁の動的システムの数理モデルを決定し、その数理モデルから振動数、減衰定数、振動モードを検出し、橋梁に生じ得る損傷の有無、位置、程度、さらには余寿命評価までを期待している。橋梁の振動データから橋梁の動的システムの数理モデルを決定することを構造同定という。数理モデルは対象橋梁の特徴を表すもので、数理モデルから振動数、減衰定数、振動モード（以下、振動特性と称する）を検出できる。橋梁に損傷が生じると、振動データに変化をもたらし、数理モデルの変化にもつながることから、振動特性は特徴量の一つとして橋梁の損傷検知に使われる。

モニタリング対象の構造物をシステムとすれば、システムの物理的な状態は何らかの数理モデルとして表現できる。その数理モデルを決定するためには、まず橋梁にセンサーを設置し、そのセンサー情報（出力情報）を収集する必要がある。また、物理現象の因果関係から橋梁の物理的な挙動が出力情報として現れるのは、何らかの原因があるはずで、それが入力情報である。

ロードセルがついたインパクトハンマー実験や加振機実験のように、入力と出力がわかれば未知のシステムの数理モデルは容易に決まる。一方で、インパクトハンマー実験あるいは加振機実験を供用中の橋梁に適用するのは交通規制を要するため好ましくない。その代わりに、出力情報だけを用いる実稼働モード解析（Operational Modal Analysis）が使われている。出力情報だけで未知のシステムの数理モデルを同定するためには入力を何らかの形でモデル化する必要がある。一般的に入力モデルとして白色雑音が使われている。

橋梁ヘルスマニタリングでは、設置されたセンサーの特性上、構造物の局所的な変化に特化した情報が得られるローカルモニタリングと、構造物全体の挙動に特化された情報が得られるグローバルモニタリングに分類できる。また、評価や意思決定に使われるセンサー情報の長さにより、短期モニタリングと長期モニタリングに区別できる。短期モニタリングは構造物の安全性評価のために集中的に短期間で計測が行われ、外力の計測も伴う。また、場合によっては、交通規制を行うことも考えられる。一方で、橋梁の健全度は経年劣化に伴い徐々に変化することから、長期モニタリングでは、特徴量の経年変化に着目することが多い。特徴量から何らかの異常の兆候を捉え、橋梁の詳細点検の可否判断につなげる目的のスクリーニングの考え方もある。

本研究では、実稼働モード解析法の中、長大橋の振動特性を推定に有効であると判断した、確率部分空間法（Stochastic Subspace Identification: SSI）とベイズ実働モード解析法（Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA）の整備を行った。また、長期モニタリングにおける季節変動などの外部因子の影響を考慮するために多変量回帰分析手法の整備も行った。

4.2 構造同定手法

4.2.1 確率部分空間法 (Stochastic Subspace Identification: SSI)

橋梁の加速度応答から振動特性を同定する時間領域の同定手法の 1 つである確率部分空間法 (Stochastic Subspace Identification: SSI) について簡単にまとめる. 安定的に卓越する振動モードを抽出するために, Stabilization Diagram (SD) を用いる.

橋梁の運動方程式は式(4-1)のように, 状態方程式で表現することができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (4-1)$$

ここで, $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{y}(k)$ はそれぞれ時刻 k での橋梁の状態変数, 観測値を示す. また, $\mathbf{w}(k)$, $\mathbf{v}(k)$ はそれぞれプロセスノイズと観測ノイズを示し, 定常なホワイトノイズを仮定する. \mathbf{A} , \mathbf{C} はそれぞれシステム行列であり, モード情報を持っている. システム行列については, 一期先予測の非定常カルマンフィルタによる状態変数の予測値と真値との誤差を最小二乗法により最小化することで, 推定することが可能となる.

さて, 次式により定義される Projection Matrix \mathbf{O}_i について考える.

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^T (\mathbf{Y}_p \mathbf{Y}_p^T)^\dagger \mathbf{Y}_p \quad (4-2)$$

ただし, $(\cdot)^\dagger$ は Moore-Penrose の擬似逆行列を表すものとする. また, \mathbf{Y}_p , \mathbf{Y}_f はそれぞれ観測値の過去および未来の情報を持つブロックハンケル行列で, それぞれ以下のように定義される.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}_p \\ \mathbf{Y}_f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(0) & \dots & \mathbf{y}(j-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}(i-1) & \dots & \mathbf{y}(i+j-2) \\ \mathbf{y}(i) & \dots & \mathbf{y}(i+j-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}(2i-1) & \dots & \mathbf{y}(2i+j-2) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

行列 \mathbf{O}_i に次式のような特異値分解を行うと,

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T = (\mathbf{U}_1 \mathbf{U}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_2 \end{pmatrix} (\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2)^T \simeq \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T \quad (4-4)$$

が得られる. ここで, 行列 \mathbf{U} , \mathbf{V} はユリタリ行列であり, 行列 \mathbf{S} は対角成分に絶対値の大きな順に特異値が配置される. つまり, 行列を構成する行空間および列空間それぞれに対応する基底ベクトルが, 行列の各成分への寄与率の大きい順に並ぶことになる. この性質を利用することでより低いランクの行列で元の行列を効果的に近似できる. 最小二乗法よりカルマンフィルタを用いて推定される状態変数 $\mathbf{X}_i = [\mathbf{x}(i) \quad \mathbf{x}(i+1) \quad \dots \quad \mathbf{x}(i+j-1)]$ は次式で得られる.

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{S}_1^{1/2} \mathbf{V}_1^T \quad (4-5)$$

式(4-4)の特異値分解により推定値の時系列 \mathbf{X}_i の行数は減少し，結果としてシステム行列の次元が小さくなる．つまり，システムの極が減少することを意味し，特異値分解を経て，システムにおいて卓越した振動特性が抽出されるものと解釈できる．

次に，システム同定において安定的に同定される振動モードを抽出するための手法として SD を用いる．例えば，システム同定におけるモデル次数を 1 次か n 次程度の範囲にわたって変化させ，横軸に同定された振動数，縦軸にモデル次数をとって，グラフにしたものである．各モデル次数で同定された結果の中で，安定的であると判断されるモードが最終的に抽出される．SD においては次のように閾値を設定して卓越するモードであるかどうかの判定を行う手法が提案されており，本研究においても以下の閾値を用いる．

$$f_{p+\kappa} - f_\epsilon < f_p < f_{p+\kappa} + f_\epsilon \quad (4-6a)$$

$$\zeta_{p+\kappa} - \zeta_\epsilon < \zeta_p < \zeta_{p+\kappa} + \zeta_\epsilon \quad (4-6b)$$

$$MAC_l < MAC_{(p,p+\kappa)} \quad (4-6c)$$

$$(\kappa = -\kappa_\epsilon, \dots, -1, 1, \dots, \kappa_\epsilon)$$

ここで，式(4-6a)は振動数，式(4-6b)は減衰定数，式(4-6c)はモード形状に関する卓越モードの評価式であり， κ_ϵ はモデル次数 p の上下それぞれで考慮するモデル次数の個数である． f_ϵ と ζ_ϵ はそれぞれ振動数と減衰定数の許容変動量を表す． $MAC_{(p,p+\kappa)}$ はモード形状 ψ_p と $\psi_{p+\kappa}$ の相関を表す指標であるモード信頼性評価基準(Modal Assurance Criterion: MAC)値， MAC_l は MAC 値の許容最小値である．MAC 値はモード形状の相関を算出する指標であり，0 から 1 までの値を持ち，1 に近いほど相関が強いことを意味する．MAC 値は式(4-7)から求められる．

$$MAC_{(p,p+\kappa)} = \frac{\|\psi_p^T \psi_{p+\kappa}\|^2}{\|\psi_p\|^2 \|\psi_{p+\kappa}\|^2} \quad (4-7)$$

κ_ϵ ， f_ϵ ， ζ_ϵ ， MAC_l の 3 つの閾値すべてを満たす振動特性を固有振動特性として同定する．これらの閾値については，明確な決定手法が未だ確立されていないため，データ長，サンプリング周波数，橋梁形式などを総合的に勘案して経験に基づき決定することが多い．

4.2.2 ベイズ実働モード解析法 (Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA)

(1) ベイズ推定の概要

ベイズ理論によるパラメータ推定においては，適当な観測データ集合 D が得られたとき，これらのデータを生起する統計的モデルの支配パラメータの集合 θ について，それらが従う確率

分布を観測データ D から推定する．観測データから事後的に推定されたパラメータの確率分布は事後分布と呼ばれ，次のベイズの定理に基づき条件付き確率密度関数 $p(\theta|D)$ で表される．

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{p(D)} \quad (4-8)$$

ここに，右辺の条件付き確率密度関数 $p(D|\theta)$ は尤度関数と呼ばれ，パラメータ θ により構成される統計的モデルにおいて観測データ D が得られた際のモデルの尤もらしさを表す関数として知られる．また， $p(\theta)$ は観測データ D が得られる以前の情報から事前に仮定されるパラメータ θ の確率分布であり，事前分布と呼ばれる．

加速度時系列の FFT データのように数多くの観測値が得られる場合，尤度関数は事後分布に対して事前分布よりも支配的となることが知られているため，既往研究においては事前分布として無情報事前分布を適用することが提案されている．無情報事前分布を仮定した場合，事後分布の確率密度関数は尤度関数に比例する．したがって振動計測において観測されたデータの尤度関数を振動特性の適当な関数として定式化することで，振動特性の事後分布を推定することが可能となる．

(2) 統計的な不確かさを考慮した振動モード同定

観測された自由度 n の加速度の時系列 $\ddot{\mathbf{x}}_j \in \mathbb{R}^n$ ($j = 1, \dots, N$) は i 次のモード応答加速度 $\ddot{\eta}_i$ ($i=1, 2, \dots, m$) の適当な重ね合わせとして次のように表される．

$$\ddot{\mathbf{x}}_j = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\phi}_i \ddot{\eta}_i(t_j) + \boldsymbol{\epsilon}_j \quad (4-9)$$

ただし， $\boldsymbol{\epsilon}_j$ はホワイトノイズとしてモデル化された観測誤差， $\boldsymbol{\phi}_i \in \mathbb{R}^n$ は i 次のモード形状である．モード応答加速度は i 次の固有角振動数 ω_i ，モード減衰比 ζ_i ，モード外力 p_i を用いて次の運動方程式で表される．

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2\eta_i(t) = p_i(t) \quad (4-10)$$

この手法においては一般的な時間領域の実稼働モード同定手法と同様に全てのモード外力が一定の PSD をもつと仮定されているが，上記の仮定は必ずしも現実に即したものではない．実際，後述する対象橋梁について筆者らが時間領域の実稼働モード同定手法の一つである SSI を適用した先行研究においては振動データの高周波帯域に顕著なノイズが分布しており，ローパスフィルタを適用しなければ振動特性推定は困難であった．ただしこのような信号処理は元の時系列の波形を歪めるため推定される振動特性に偏りを生じる恐れがある．以上の問題を避ける方法として対象とする振動モードについてそれらに対応した周波数帯域のみに着目した振動特性推定が挙げられる．このような周波数領域の振動特性推定の手法として FFT に基づくベイズ推定の手法 Yuen と Katafygiotis により提案された．

観測された加速度の時系列 $\ddot{\mathbf{x}}_j$ の FFT は次のように定義される．

$$F_k = \sqrt{\frac{2\Delta t}{N}} \sum_{j=1}^N \ddot{x}_j \exp \left[-\frac{2\pi i(k-1)(j-1)}{N} \right] \quad (4-11)$$

ただし、 i は虚数単位、 Δt はサンプリング周期である。ここで、FFT データの実部と虚部により構成される次のようなベクトルを考える。

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \text{Re } F_k \\ \text{Im } F_k \end{bmatrix} \in R^{2n} \quad (4-12)$$

このとき、式(4-12)のベクトル \mathbf{Z}_k は次のような共分散行列をもつガウス分布として定式化される。

$$\mathbf{C}_k = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Phi \text{Re } \mathbf{H}_k \Phi^T & -\Phi \text{Im } \mathbf{H}_k \Phi^T \\ \Phi \text{Im } \mathbf{H}_k \Phi^T & \Phi \text{Re } \mathbf{H}_k \Phi^T \end{bmatrix} - \frac{S_e}{2} \mathbf{I}_{2n} \quad (4-13)$$

ここに、 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$ であり、 S_e は予測誤差 ϵ_j の PSD (定数)、 \mathbf{I}_{2n} は $2n$ 次の単位行列である。また、 $\mathbf{H}_k \in C^{m \times m}$ は式(4-10)から理論的に導出される次式のようなモード加速度の PSD 行列である。

$$\mathbf{H}_k = \text{diag}(\mathbf{h}_k) \mathbf{S} \text{diag}(\mathbf{h}_k^*) \quad (4-14)$$

ここに $\mathbf{S} \in C^{m \times m}$ はモード外力の PSD 行列 (定数行列) である。また $\text{diag}(\cdot)$ はベクトルの対角行列への変換を表し、アスタリスク $[\cdot]^*$ は共役転置を表す。また $\mathbf{h}_k \in C^m$ は第 i 成分が次式で与えられるモード伝達関数のベクトルである。

$$h_{ik} = [(\beta_{ik}^2 - 1) + i(2\zeta_i \beta_{ik})]^{-1} \quad (4-15)$$

ここに、 $\beta_{ik} = f_i/f_k$ は固有振動数 $f_i = \omega_i/2\pi$ と FFT に対応する周波数 $f_k = (k-1)/N\Delta t$ との比で定義される周波数比である。

以上から、観測値 $D = \{\mathbf{Z}_k\}$ について尤度関数を次のように定義できる。

$$p(\{\mathbf{Z}_k\}|\theta) = (2\pi)^{-nN} \exp[-L(\theta)] \quad (4-16a)$$

$$L(\theta) = \frac{1}{2} \sum_k \ln |\mathbf{C}_k(\theta)| + \frac{1}{2} \sum_k \mathbf{Z}_k^T \mathbf{C}_k(\theta)^{-1} \mathbf{Z}_k \quad (4-16b)$$

ここに、パラメータ θ は固有振動数 f_i 、減衰比 ζ_i 、モード形状 ϕ_i 、モード外力の PSD 行列 \mathbf{S} および予測誤差の PSD である S_e の集合として定義される。また $L(\theta)$ は負の対数尤度関数 (NLLF: Negative Log Likelihood Function) である。無情報事前分布を仮定した場合、パラメータの事後分布は尤度関数に次式のように比例する。

$$p(\theta|\{\mathbf{Z}_k\}) \propto \exp[-L(\theta)] \quad (4-17)$$

したがって事後分布の確率密度関数 $p(\theta|\{\mathbf{Z}_k\})$ におけるパラメータ θ の最確値(MPV: Most Probable Value)を求める問題は、目的関数 NLLF の最小化問題となる。上記のような NLLF を最小化する(すなわち、尤度関数を最大化する)パラメータ θ の推定問題は、統計学の分野で最尤推定法として知られている。

パラメータ θ のMPVを $\hat{\theta}$ で表す。このとき、NLLFは $\hat{\theta}$ についてのテイラー展開により次のように近似される。

$$L(\theta) \approx L(\hat{\theta}) + \frac{1}{2}(\theta - \hat{\theta})^T \hat{H}_L(\theta - \hat{\theta}) \quad (4-18)$$

ここで、 \hat{H}_L はNLLFのヘッセ行列である。これを式(10)に代入すると

$$p(\theta|\{\mathbf{Z}_k\}) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}(\theta - \hat{\theta})^T \hat{H}_L(\theta - \hat{\theta})\right] \quad (4-19)$$

となるため、パラメータの事後分布 $p(\theta|\{\mathbf{Z}_k\})$ は期待値 $\hat{\theta}$ 共分散行列 \hat{H}_L^{-1} の多変量正規分布として与えられる。

以上より、固有振動数 f_i 、減衰比 ζ_i 、モード形状 ϕ_i 、モード外力のPSD行列 \mathbf{S} および予測誤差のPSDである S_e のそれぞれについて、観測された加速度データにより算出される事後分布から、最も確からしい値を示す期待値および推定値の不確かさを示す分散を得ることができる。

4.3 季節変動の推定と調整

4.3.1 最小2乗回帰モデル (Ordinary Least Squares Regression: OLSR)

長期モニタリングにおける変位, 振動数のようなセンサ情報を y , また気温, 交通量, 風速などの外部因子を \mathbf{X} とすると, 観測センサ情報と外部因子の線形回帰モデルの一般的形式は式 (4-20)のように表す.

$$y = \mathbf{w}\mathbf{X} + \varepsilon \quad (4-20)$$

ここに, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ は外部因子, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ は観測センサ情報と外部因子の線形関係を表す線形回帰係数ベクトル, また, ε は誤差項を表す.

長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係は, 線形回帰係数ベクトルにより支配されることになる. 結局, 下記の目的関数の式 (4-21) を最小にする係数ベクトル ($\hat{\mathbf{w}}$) の同定問題に帰着する.

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{n} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\mathbf{X}\|_2^2 \quad (4-21)$$

ここに, $\|\cdot\|_2$ は L_2 ノルムを表す.

4.3.2 スパースモデル (Least absolute shrinkage and selection operator : LASSO)

スパースモデリングは, 近年, 情報学, 機械学習, 統計学など, 様々な分野から注目を集めているが, 統計学で最もよく用いられるスパースモデリングは, L_1 正則化法であり, その代表が, LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)である. LASSO は, 回帰モデルの損失関数にパラメータの L_1 ノルムに基づく正則化項を加えた正則化損失関数を最小化することによってパラメータを推定する方法で, 推定の安定化とともに変数選択も行うことができる. LASSO 型の目的関数を式 (4-22) に示す.

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{n} \|\mathbf{y} - \mathbf{w}\mathbf{X}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|_1 \quad (4-22)$$

ここに, $\|\cdot\|_1$ は L_1 ノルムを, λ は正則化係数を表す.

4.3.3 ベイズ線形回帰 (Bayesian linear regression: BLR)

ベイズ線形回帰は線形回帰にベイズ推論を導入した手法である. 例えば, 季節変動の訓練データの数に限られている場合, 対象となるモデルのパラメータの事前分布を仮定し, 得られたデータの情報を用いてパラメータの事後分布 (教師信号の予測分布) を求めるベイズ線形回帰による季節変動の予測に適用されている.

同様に長期モニタリングにおける観測センサ情報と外部因子の線形的な関係を表す線形回帰係数ベクトルの推定にも利用できる. ただし, 線形回帰式(4-20)の誤差の分布は平均0, 逆Gamma分布分散を持つ正規分布と仮定する (式(4-23)参照).

$$\begin{cases} \varepsilon \sim N(\varepsilon|0, \sigma_n^2) \\ \sigma_n^2 \sim \text{Inv-Gamma}(\sigma_n^2|a, b) \end{cases} \quad (4-23)$$

ここに、 ε は回帰の誤差分布、 σ_n^2 は誤差の逆 Gamma 分布分散、 a および b は超パラメータを表す。

ベイズ理論により推定係数ベクトルの事後確率分布を式 (4-24) に示す。

$$p(w|X, y, \sigma_n^2) = \frac{p(y|X, w, \sigma_n^2)p(w)}{p(y|X, \sigma_n^2)} \quad (4-24)$$

ここに、 $p(\cdot)$ は確率密度分布を、 $p(\cdot|\cdot)$ は条件確率分布を表す。

式 (4-24) から MPV (Most Probable Value) 推定により \hat{w} が得られる。ベイズ線形回帰の仕組みは逐次推定への拡張が容易であり、モニタリングデータの実時間処理に有用である。

4.3.4 ガウス過程回帰 (Gaussian process regression: GPR)

ガウス過程回帰は、式 (4-25) のように、入力変数 X から出力変数である実数値 y への関数 $y = f(X)$ を推定するモデルの一つであり、線形回帰モデルの無限次元への拡張を表すものである。また、潜在機能 (Latent function) $f(X)$ の推定にはベイズ推定を利用する。

$$y = f(X) + \varepsilon \quad (4-25)$$

式 (4-25) の $f(X)$ は式 (4-26) の確率過程を従うと仮定する。

$$f(X) \sim GP[0, k(X, X^T)] \quad (4-26)$$

ここに、 $k(X, X^T) = E[f(X)f(X^T)]$ は分散を表す。T は転置を表す。 $\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$ が IID, $k(\cdot)$ がカーネル分散行列を表すと、予測事後確率分布は式 (4-27) のように求められる。

$$\begin{aligned} p(f_*|X, y, X_*, \sigma_n^2) &= N(f_* | \bar{f}_*, cov(f_*)) \\ \bar{f}_* &= k(X_*, X)[k(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y \\ cov(f_*) &= k(X_*, X_*) - k(X_*, X)[k(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} k(X, X_*) \end{aligned} \quad (4-27)$$

ここに、 X_* はテストデータを、 f_* はテストデータによる予測潜在機能を、 \bar{f}_* は平均予測潜在機能を表す。

ガウス過程回帰の特徴の一つはその非線形性であり、線形回帰ではうまくフィッティングできない場合にも有効である。もう一つ重要な特徴はベイズ推定を用いる点である。推定される関数は一つの関数ではなく、関数の分布として得られることから、推定の不確実性を表現することができる。ただし、高次元データを取り扱う場合 GPR の計算負担は高く、さらに尤度関数が非ガウス分布の場合は取り扱いにくい点もある。

4.3.5 自己回帰和分移動平均モデル (Autoregressive integrated moving average model: ARIMA model)

定常な時系列過程を前提とした ARMA モデルとは異なり ARIMA モデルは非定常過程に対する時系列モデルである。時系列において平均値が時間的に変動する場合 (傾向変動が見受けられる場合など) は非常によく見受けられるものであり、それらに対して、ARMA モデルはそのままでは適用できない。そのため、平均値揺動を取り除くために様々な方法が用いられるが、時系列の階差をとり、その階差時系列に対して ARMA モデルを適用する。このモデルを ARIMA モデルあるいは自己回帰和分移動平均モデルという。

ARIMA(p, d, q)モデルの基本形式を式(4-28)に示す。

$$\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i L^i\right) (1-L)^d y_t = \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i\right) \varepsilon_t \quad (4-28)$$

ここに、 L は時間遅れ演算子を、 p はAR成分の次数を、 q はMA成分の次数を、 d は積分次数を表す。パラメータ(p, d, q)が決まれば、観測データおよび誤差 ε_t の統計特性から係数 ϕ_i と θ_i が計算できる。

4.3.6 共和分・多変量誤差修正モデル (Co-integration and vector error correction model:)

経済時系列データの因果関係の分析法である多変量誤差修正モデル (VECM) は、変数間に共和分関係があるときに使えるモデルであり、誤差修正モデルに双方向の因果を想定した多重時系列モデル (Multiple Time Series Models) の 1 つであるベクトル自己回帰モデル (VAR) の概念を加えたものである。したがって、多変量誤差修正モデルも多重時系列モデルの 1 つである。多くの時系列では一般的に、最初の差分で定常になると考えられ、時系列データの差分を取り、前述の ARIMA などのモデルを推定する。そのようなモデルからの予測は、データにある周期性と季節性を反映するが、データに含まれる長期的なトレンドに関する情報は失われ、長期予測は信頼できなくなる欠点が指摘されている。

VECM の概念は、定常変数を生み出す線形結合をあるシステム内の長期的な均衡関係式と見なし、過去に生じた誤差 (均衡からの外れ具合) が均衡に向けて修正される動きが現在の短期的変動にも影響を与える、という解釈を施すものである。すなわち VECM は変数間に何らかの長期的均衡が存在する場合の分析手法として用いられる。

1) 共和分モデル (Cointegration model)

非定常性を持つ時系列データで、データの合成によって定常過程 ($I(0)$) として表現できる場合、これらのデータ間には共和分関係があると言える。そのときの共和分モデルを式 (4-29) に示す。

$$u_t = \theta^T X_t, \quad u_t \sim I(0) \quad (4-29)$$

ここに、 θ は共和分ベクトルを示しており、データ X_t の成分同士の長期的な関係 (例えば、季節変動のようなトレンド) を示す係数行列、 u_t は定常確率過程 ($I(0)$) を表す。

2) ベクトル誤差修正モデル (VECM)

ある時系列変数同士が共和分の関係にあれば、その時系列変数同士の短期的な関係を適切に表現し系列データ同士の共和分関係を自動的に構築する誤差修正モデル (ECM) が存在する (式 (4-30))。

$$AR(L)(1-L)X_t = -\lambda u_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4-30)$$

ここに、 L は ARIMA モデルと同様には時間遅れ演算子を、 $AR(L)$ は AR 多項式を、 λ は一般的に $\lambda \in (0,1)$ の調整係数を、 ε_t は白色雑音の誤差モデルを表す。

式 (4-30) によると、 X_t は過去の値のみならず過去の均衡バイアスと関連がある。過去の u_{t-1} を用いて、 X_t の修正が可能である。すなわち、修正前の均衡バイアスが正であれば、修正項が負になり、結果的に Δu_t とともに $\Delta X_t = (1-L)X_t$ の低減につながる。言い換えれば、過去より現在がより均衡点に近いことを示す。

共和分・多変量誤差修正モデルの推定には一般的に Eagle–Granger テストと Johansen テストが用いられる。

Eagle–Granger テスト

ステップ 1 : 変数に対する最小 2 乗回帰 (OLSR) と残差に対する拡張ディッキー–フラー検定 (Augmented Dickey–Fuller test : ADF test) を適用。上記のように、残差に定常性があれば共和分が存在する。

ステップ 2 : 修正誤差モデル (ECM) 構築のために最小 2 乗回帰 (OLSR) を適用。ただし、Eagle–Granger テストは安定的な手法である反面、一つの最小 2 乗回帰に対して一つの共和分を考慮するために、2 変数までのデータに有効である。

Johansen テスト

Eagle–Granger テストの弱点である多変量データに適用するために提案された手法である。

Johansen テストは最尤法とベクトル誤差修正モデル (式 (4-31)) を用いて、多変量データ間の共和分関係を判別する。

$$\Delta \mathbf{y}_t = \mathbf{\Pi} \mathbf{y}_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \mathbf{B}_j \mathbf{y}_{t-j} + \boldsymbol{\phi} \mathbf{D}(t) + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (4-31)$$

ここに、 $\mathbf{\Pi} = \mathbf{A}\mathbf{B}$ 、(ただし \mathbf{A} は調整係数行列、 \mathbf{B} は共和分ベクトルで構成される行列)、 \mathbf{B}_j は AR モデルの係数行列を、 $\boldsymbol{\phi} \mathbf{D}(t)$ は共和分ベクトル内に (または共和分ベクトルを制約する) 決定論的な項があることを示している。もちろん共和分ベクトル外の決定論的な項を使用することもできる。 $\boldsymbol{\varepsilon}_t$ は白色雑音の誤差モデルを表す。また、 $\mathbf{\Pi}$ のランクは、多変量変数間の共和分の数に一致する。

4.4 まとめ

本年度に整備された構造同定手法と季節変動調整法は、次年度のデータ分析に導入し、特殊橋のモニタリングに適したモニタリング法の検討に活かす予定である。特に、構造同定法として、時間領域の実働モード同定法の代表的な手法である部分空間法 (Subspace Stochastic Identification: SSI) と周波数領域の実働モード同定法であるベイズ FFT に基づくベイズ実働モード解析法 (Bayesian Operational Modal Analysis: BAYOMA) について整備を行った。整備を行った二つの同定法は 2 段階構造同定に利用する計画である。すなわち、時間領域の実働モード同定法を用い常時振動データから着目すべき振動数帯域を定め、次に周波数領域の実働モード同定法に基づき、モニタリング対象の振動数帯域における高精度モード同定を行う。特に、ベイズ実働モード解析法は、高い精度での推定が可能であり、着目する振動数帯域の卓越振動特性の事後確率分布を推定することから意思決定やリスク評価において有用な同定結果を提供する可能性が高い。

長期モニタリングの観点からは高精度に同定が行われても、同定振動特性は構造物の状態の変化がない場合でも季節変動をもたらす変化が観測されることから、季節変動の影響を除去し構造物の異常について検討を行う必要がある。一方で、実橋でのモニタリングデータを用いた季節変動の推定と調整法に関する検討は、供用期間中の健全性のトレンドを分析する長期モニタリングには欠かせない項目であるが、関連研究は少ないのが現状である。それで、五つの線形および非線形回帰手法の整備を行った。

整備した解析手法を用いた長期モニタリングの流れを図 4.1 に示す。関連して、次年度以降の実測データの分析などの運用する予定である。

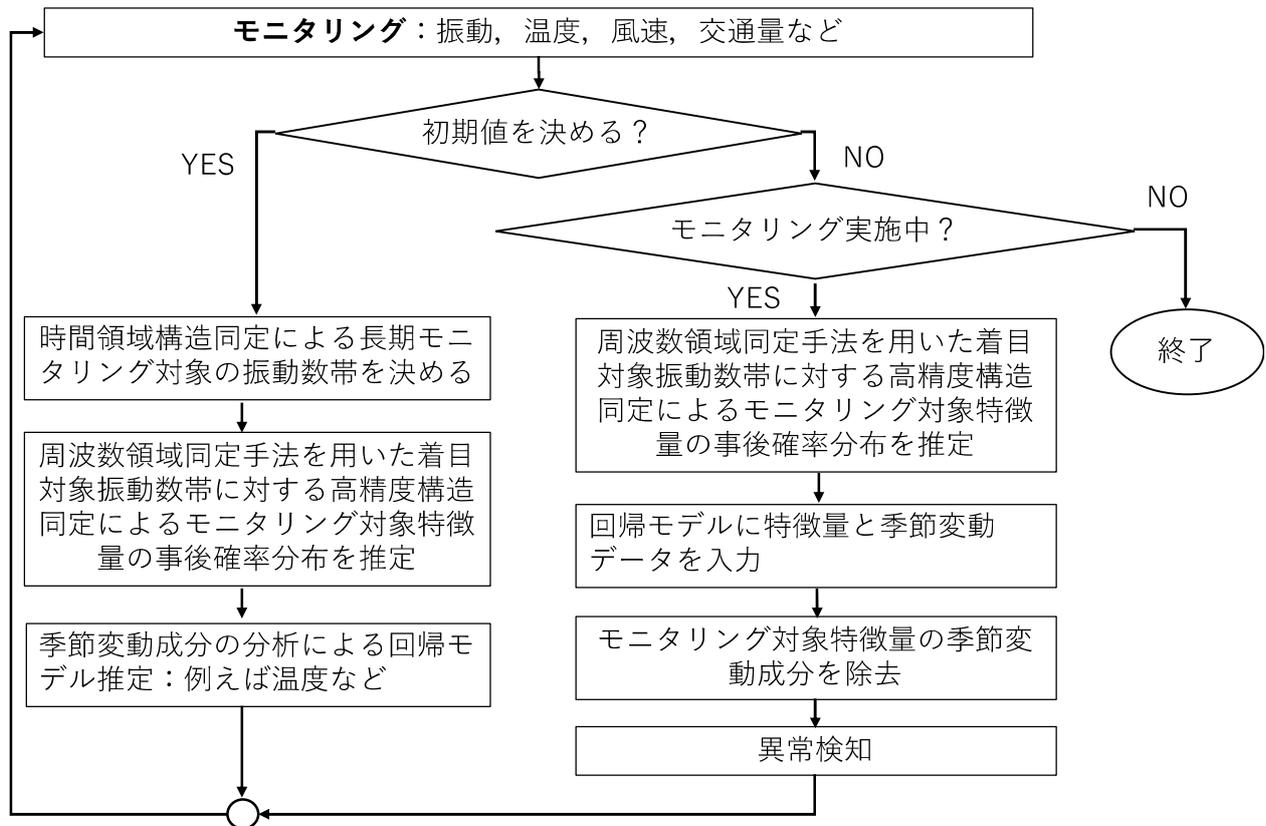


図 4.1 整備した解析手法による長期モニタリングの概念

第5章 長期計測データにおける季節変動の調査

5.1 概要

センシングによる長大橋梁のモニタリングには、異常発見により行う短期的なモニタリング（キャンペーン型モニタリング）とセンサ情報の長期にわたるトレンドの変化に着目する長期モニタリングに大別できる。モニタリングの実用的な利用を考えると、対象橋梁の挙動変化あるいは振動数などの特徴量の変化に着目し長期にわたるトレンドの変化から詳細点検もしくは短期的なモニタリングの必要性について判断を行うのが合理的であると考えられる。一方で、長期モニタリングに着目する場合、構造物の剛性などに関連がある特徴量の変動には構造物の剛性の変化のみならず、気温や交通量の変化によっても変動することが知られている。

長期モニタリングの特徴量に含まれる構造物の健全性に関わる変動と気温や交通量の変化がもたらした変動を区別しない限り、長期モニタリングによる異常検知は容易ではない。特に、吊り構造を持つ吊り橋などは温度に加えて風による影響も大きい。しかしながら長期モニタリングにおける特徴量の季節変動に関する既往の研究や経験が少なく、吊り構造を持つ橋梁の特徴量の季節変動について調査するのは、吊り構造の特殊橋のみならず一般橋の長期モニタリングの計画のためにも大変意義がある。

本章では、第3章の特殊橋モニタリングの実態調査から選定した吊り橋の2017年8月～2018年9月の実測データを用い、長期モニタリングにおける特徴量の長期にわたる変動と風速、気温の変化などの環境要因との関連性の事前検討を行った結果を報告する。また、一般橋の振動モニタリングによる異常検知における季節変動の影響を報告する。

5.2 吊り橋の長期計測データの分析

5.2.1 モニタリング概要

第3章の特殊橋モニタリングの実態調査から選定した明石海峡大橋（吊り橋）の2017年8月～2018年9月の実測データを用い、長期モニタリングにおける特徴量の長期にわたる変動と風速、気温の変化などの環境要因との関連性の事前検討を行う。

図5.1に対象橋の計測点を示す。その拡大図を図5.2示す。計測内容は、風向、風速、桁端変位、温度、GPSによる変位、速度を対象にしていたが、着目期間中の長期モニタリングでは速度の計測は行われていない。

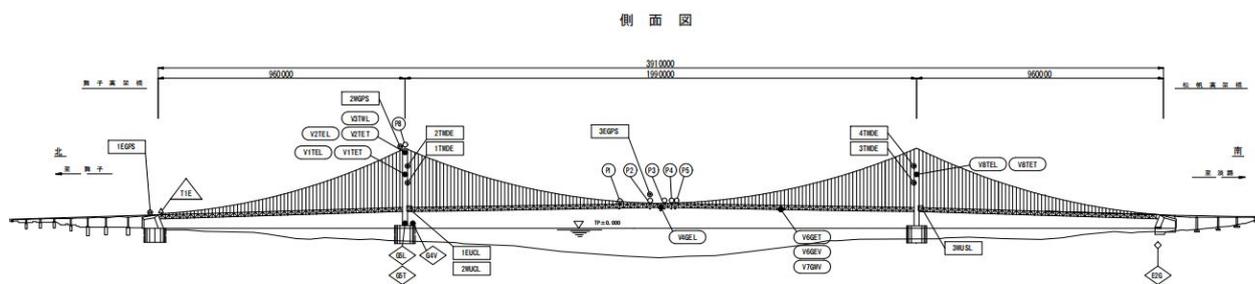
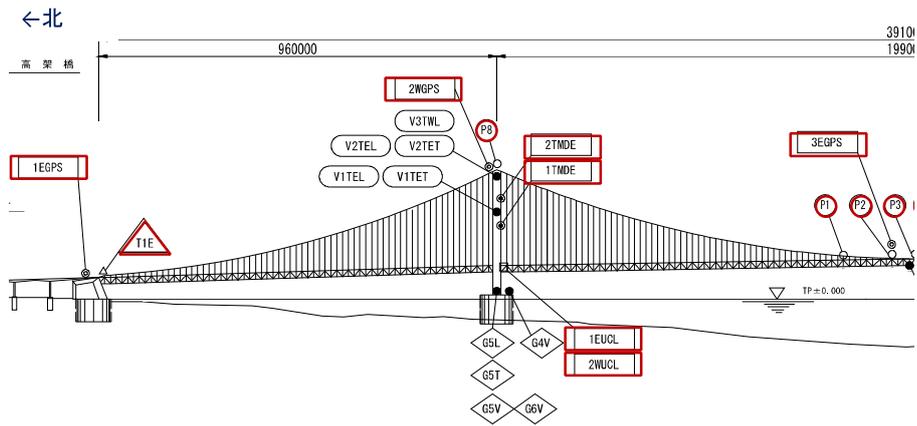
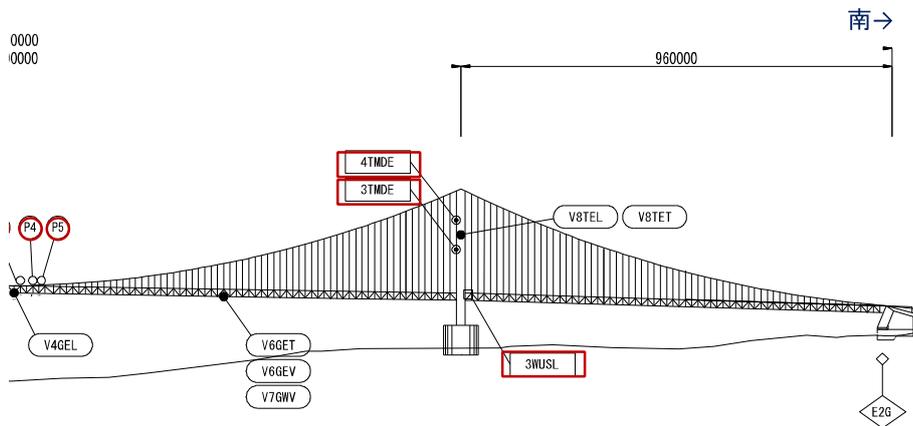


図 5.1 対象橋のセンサ設置位置



(a)スパン中央から北方向



(b)スパン中央から南方向

図 5.2 対象橋のセンサ設置位置（拡大図）

表 5.1 風向風速計データの記号

風向風速計											
中央径間中央付近										2P 塔頂	
風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速
deg.	m/s	deg.	m/s	deg.	m/s	deg.	m/s	deg.	m/s	deg.	m/s
P1	P1	P2	P2	P3	P3	P4	P4	P5	P5	P8	P8
(WD)	(WV)	(WD)	(WV)	(WD)	(WV)	(WD)	(WV)	(WD)	(WV)	(WD)	(WV)

表 5.2 変位，温度，GPS データの記号

桁端変位			温度	GPS					
橋軸	橋軸	橋軸	1A スプレー室内ケー	2P 塔頂			中央径間中央		
			ブル表面	橋軸	橋直	鉛直	橋軸	橋直	鉛直
μm	μm	μm	℃	m	m	m	m	m	m
1EUCL	2WUCL	3WUSL	T1E	2WGPS (X)	2WGPS (Y)	2WGPS (Z)	3EGPS (X)	3EGPS (Y)	3EGPS (Z)

詳細な計測内容は以下のとおりである。計測データの記号については表 5.1 および表 5.2 にまとめる。

- 風向風速データ: P1 – P5, P8 (WD:風向, WV : 風速)
- 桁端変位データ: 1EUCL,2WUCL,3WUSL
- 温度データ : T1E
- GPS データ : 2WGPS, 3EPGS(X,Y,Z の 3 成分)
- 速度データ: V1TEL – V8TET (データ取得してない)

2017 年 8 月～2018 年 9 月の計測データの時系列を図 5.3 に示す。図から分かるように、GPS データについては、データの欠損が見られる。また 2018 年 7 月 31 日に引かれた縦線 (Data partition line) は、第 4 章で説明した季節変動の回帰モデルを作成するための教師データとテストデータの境界線を示す。特記すべき点は、温度 (T1E)の変動と桁端変位データ (1EUCL) および中央径間中央の鉛直方向の GPS 変位の長期的なトレンドが互いに類似であることが分かる。観測データ間の相関については 5.2.2 で報告する。

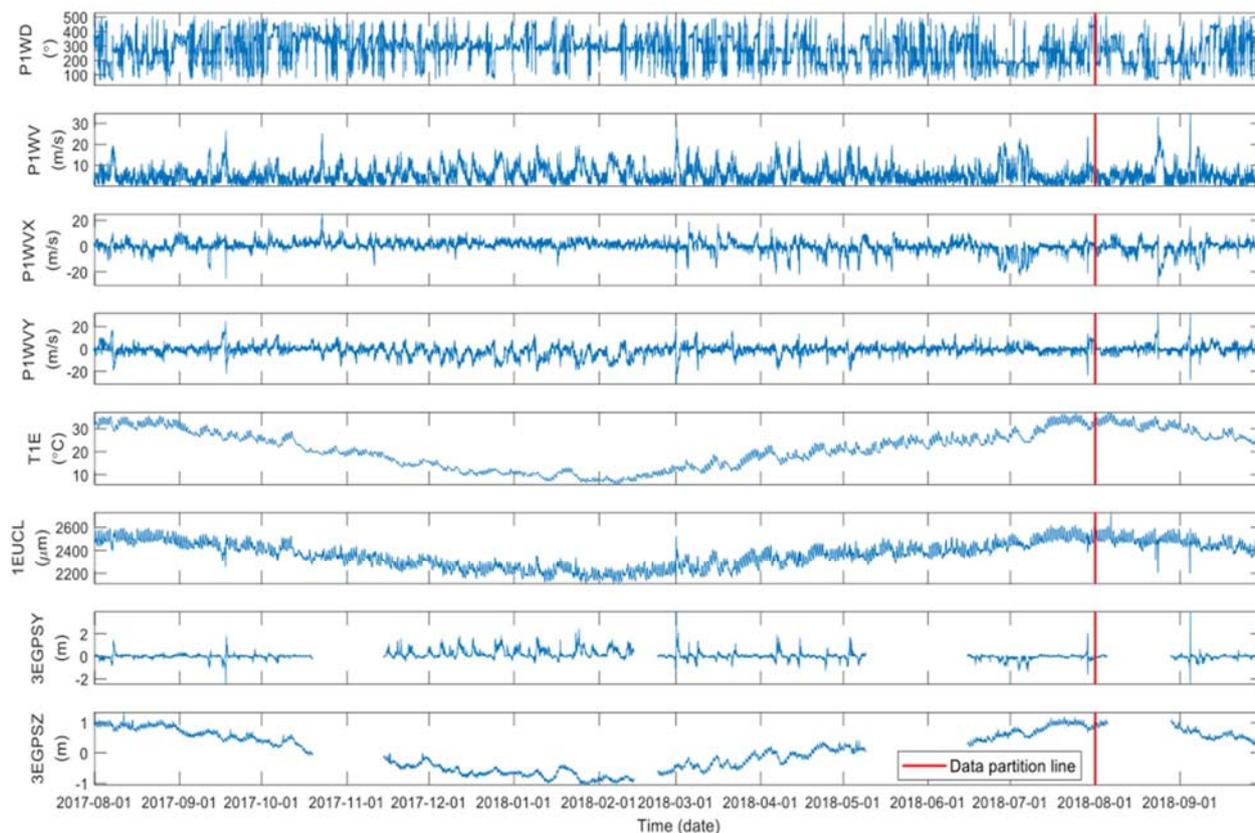


図 5.3 計測データの時系列

5.2.2 長期モニタリングの季節変動の回帰分析

図 5.3 から計測の間には相関があることがわかった。一方で、全ての計測量（以下、変数と称する）の間に相関が存在するかは時系列データからは確認できない。それで、多変数間の相関を調べるために相関行列を計算し、図化したものを図 5.4 に示す。

図から風速 P1WV は GPS 変位の 2WGPSY (2WGPS の橋軸直角成分) と 3EGPSY (3EGPS の橋軸直角成分) と相関があることがわかる。特に、風速を橋軸方向 (P1WVX) と橋軸直角方向 (P1WVY) に分けたときの相関を見るとその相関が明確である。風向 P1WD と GPS 変位の 2WGPSY (2WGPS の橋軸直角成分) と 3EGPSY (3EGPS の橋軸直角成分) との相関については風速と同様に風向を正負に分けて検討する必要がある。

長期モニタリングにおいて吊り橋の変位と温度との相関について検討すると、温度 (T1E) と橋軸方向の変位 (1EUCL, 2WUCL, 3WUSL) と 2P 塔頂の橋軸方向の GPS 変位 (2WGPSX) および中央径間中央の鉛直方向の GPS 変位 (3EGPSZ) との間には強い相関があることが分かる。

特に、中央径間中央の鉛直方向の GPS 変位 (3EGPSZ) への風速と温度の影響を見ると、中央径間中央の鉛直方向の GPS 変位 (3EGPSZ) は温度との相関が卓越することが分かる。

以上の相関の検討から季節変動の主要因として風速 (P1WVX~P5WVX, P1WVY~P5WVY, P8WVX, P8WVY) と温度 (T1E) に着目して、橋軸方向変位 (1EUCL, 2WUCL, 3WUSL) を特徴量とした場合の回帰解析を行い季節変動の影響の除去を行う。風速については計測点 P1 から P5 の橋軸方向および橋軸直角方向については平均風速を、P8 測点については計測データをそのまま考慮する。

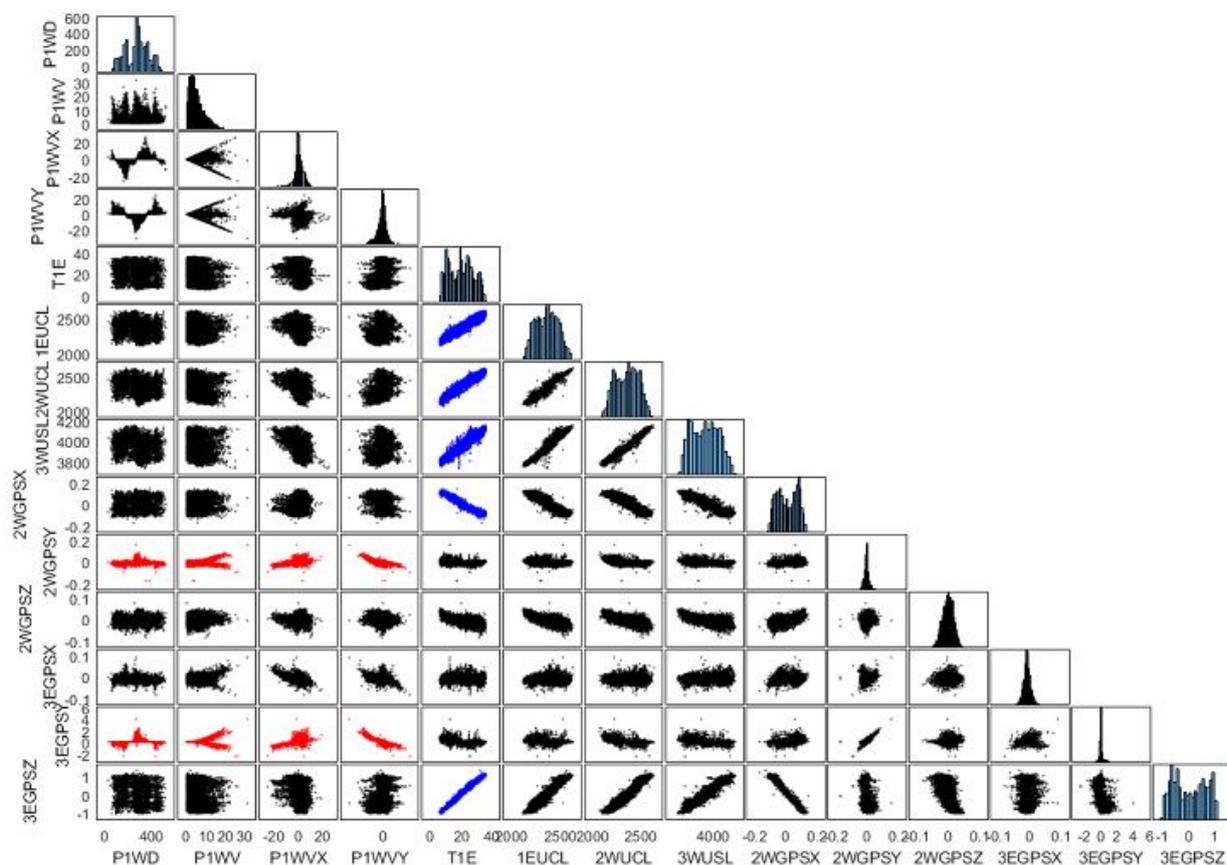


図 5.4 計測データ間の相関行列

1) 最小 2 乗回帰 (OLSR)

橋軸方向変位 (1EUCL, 2WUCL, 3WUSL) に対する風速と温度の影響の最小 2 乗回帰による予測時系列を図 5.5 に示す。前述の通り最小 2 乗回帰モデル作成には 2017 年 8 月 1 日から 2018 年 7 月 31 日のデータを学習データとして利用する。作成した最小 2 乗回帰モデルを用いて、2018 年 8 月 1 日以降の変位の予測を行なっている。図 5.5 の黒点の時系列は観測時系列を示している。青線は予測時系列を、緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している。予測精度を確認するための予測誤差の時系列を図 5.6 に、予測誤差分布を図 5.7 に示す。図 5.7 の予測誤差の平均値を見ると 1EUCL については、学習データについては予測誤差がゼロであり、テストデータについては予測誤差が-5.51, 2WUCL については、学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと-5.57, 3WUSL については、学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと 1.92 となっている。

ここで特記すべき点は、予測誤差が極端に悪いタイミング (例えば、図 5.6 の 2018 年 9 月 1 日前後と 3WUSL については 2017 年 9 月中旬と 10 月初旬前後) があることである。これは橋軸直角方向の風速が速いとき (20m/s 前後) に予測誤差が大きくなっている。突発的な変動要因は線形回帰モデルには反映されないためその予測誤差が大きくなっていると考えるのが自然である。言い換えれば、突発的な変動要因がないにもかかわらず予測誤差が極端に悪い場合、構造的な異常である可能性を示すものと解釈することもできる。

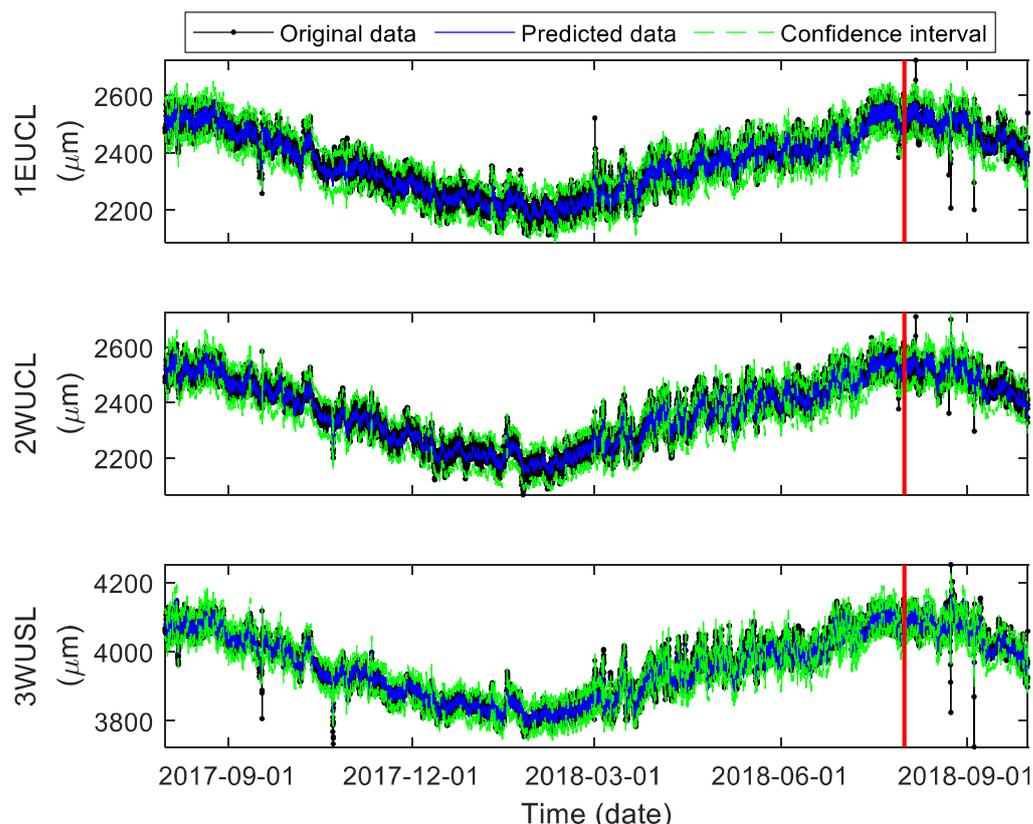


図 5.5 線形回帰による予測橋軸方向変位

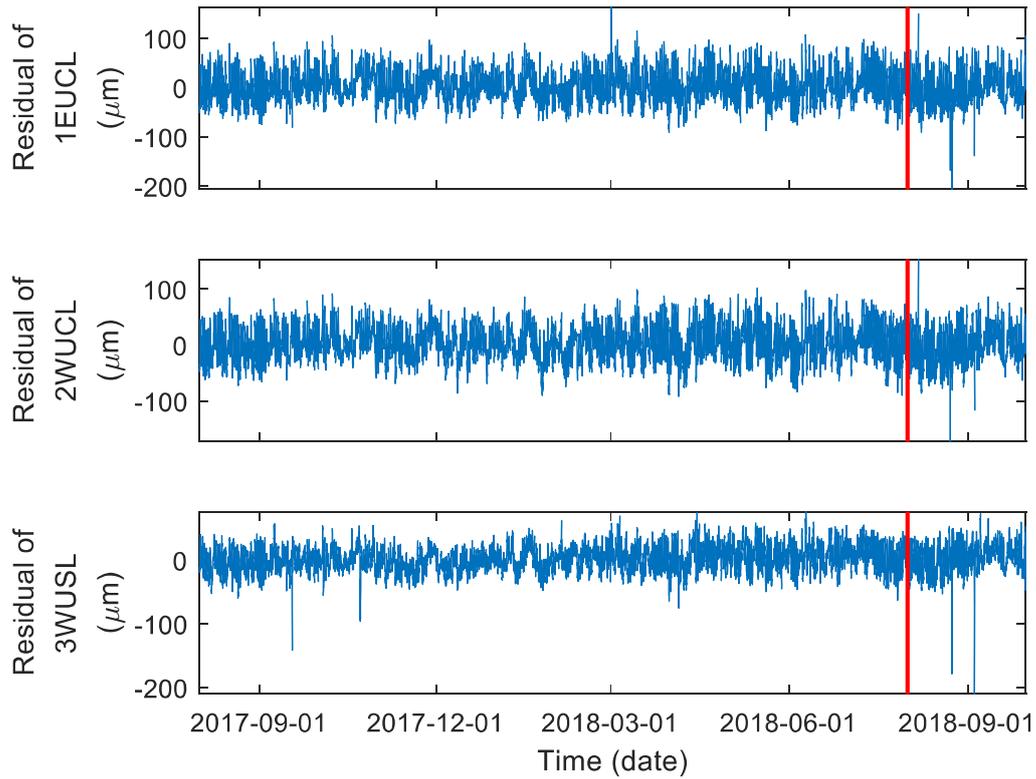


図 5.6 線形回帰による橋軸方向変位の予測誤差

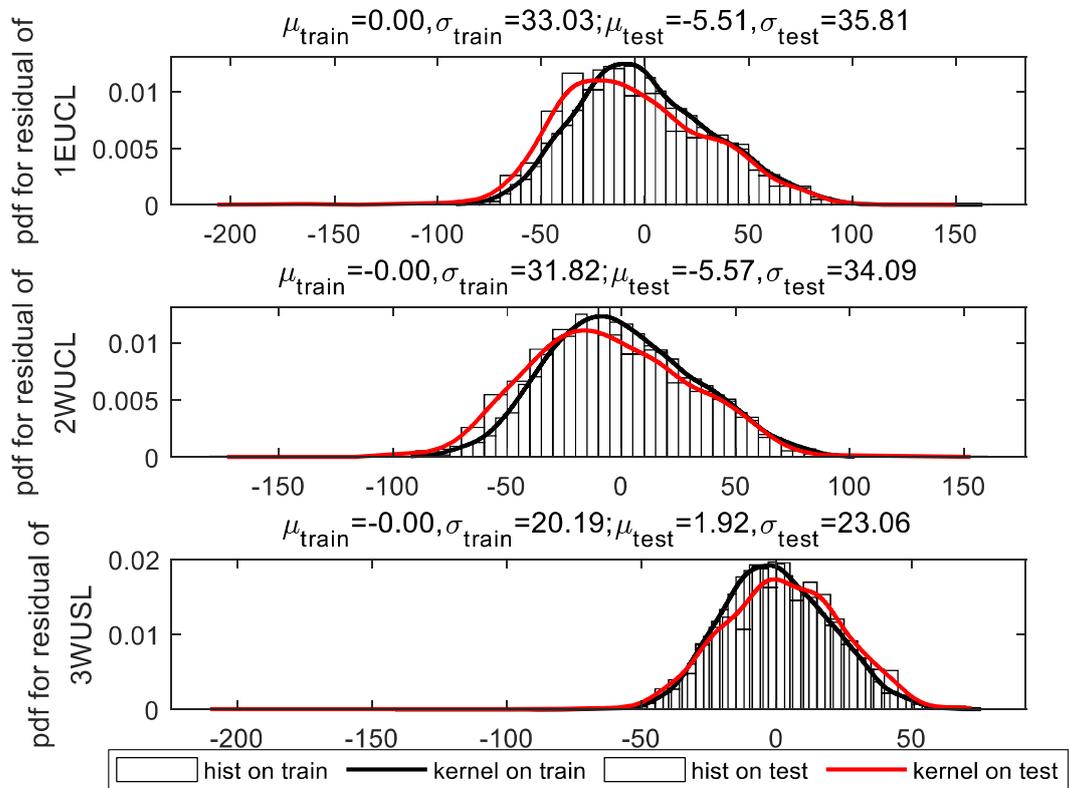


図 5.7 線形回帰による橋軸方向変位の予測誤差分布

2) スパース回帰 (LASSO)

橋軸方向変位 (1EUCL, 2WUCL, 3WUSL) に対する風速と温度の影響の LASSO 回帰による予測時系列を図 5.8 に示す. 最小 2 乗回帰と同様にモデル作成には 2017 年 8 月 1 日から 2018 年 7 月 31 日のデータを学習データとして利用する. LASSO 回帰モデルを用いて, 2018 年 8 月 1 日以降の変位の予測を行なっている. 図 5.8 の黒点の時系列は観測時系列を示している. 青線は予測時系列を, 緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している. 予測精度を確認するための予測誤差の時系列を図 5.9 に, 予測誤差分布を図 5.10 に示す. 図 5.10 の予測誤差の平均値を見ると 1EUCL については, 学習データについては予測誤差がゼロであり, テストデータについては予測誤差が-2.81, 2WUCL については, 学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと-2.10, 3WUSL については, 学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと 3.58 となっている. 全般的に最小 2 乗回帰よりは予測精度が向上していると言える.

予測誤差が極端に悪いタイミング (例えば, 図 5.9 の 2018 年 9 月 1 日前後と 3WUSL については 2017 年 9 月中旬と 10 月初旬前後) については, その傾向は最小 2 乗回帰と同様である. LASSO 回帰も基本的に線形回帰の概念に基づいており, 突発的な変動要因は線形回帰モデルには反映されないためその予測誤差が大きくなっていると考えるのが自然である.

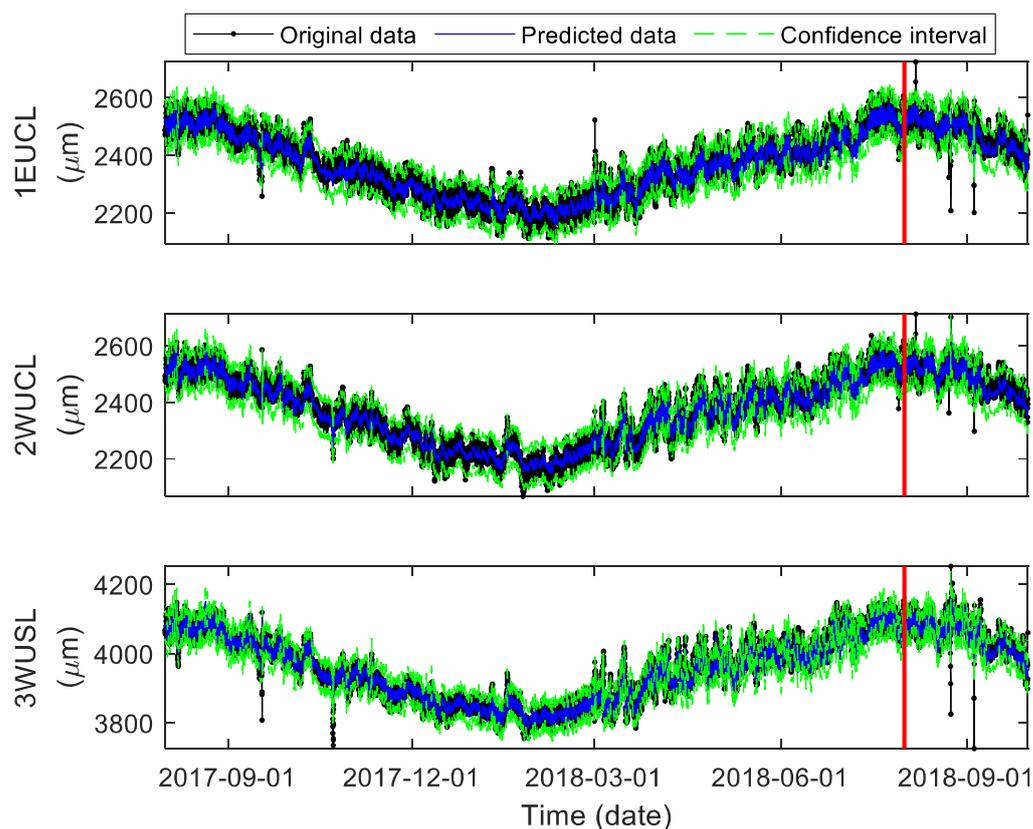


図 5.8 LASSO 回帰による予測橋軸方向変位

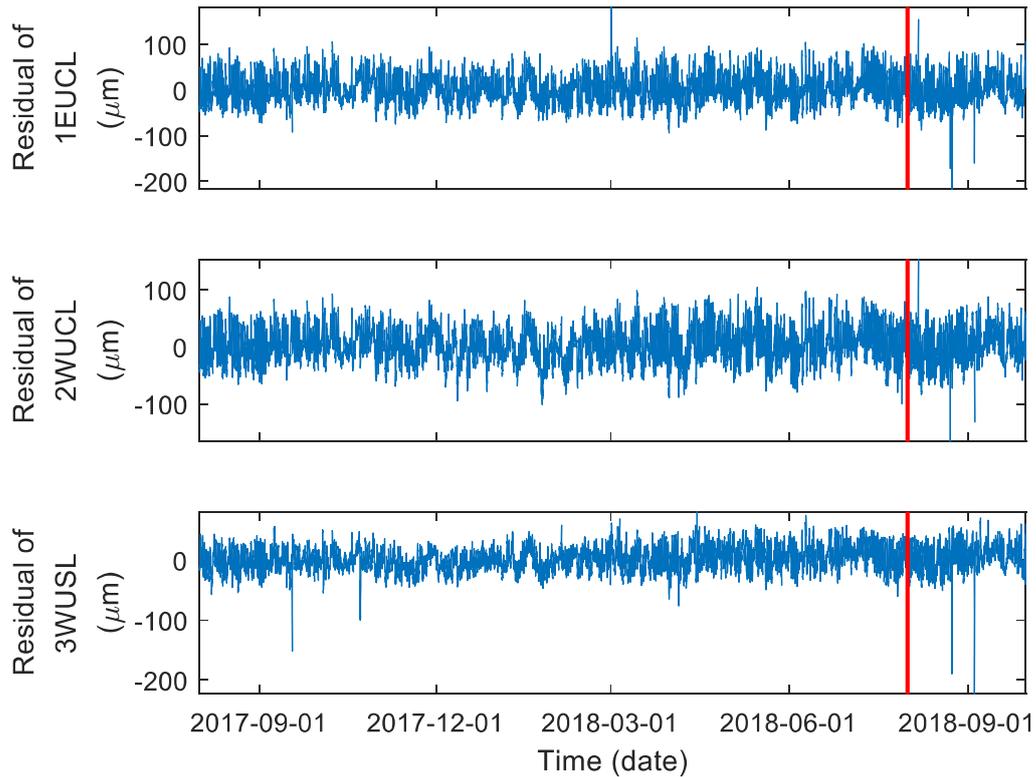


図 5.9 LASSO 回帰による橋軸方向変位の予測誤差

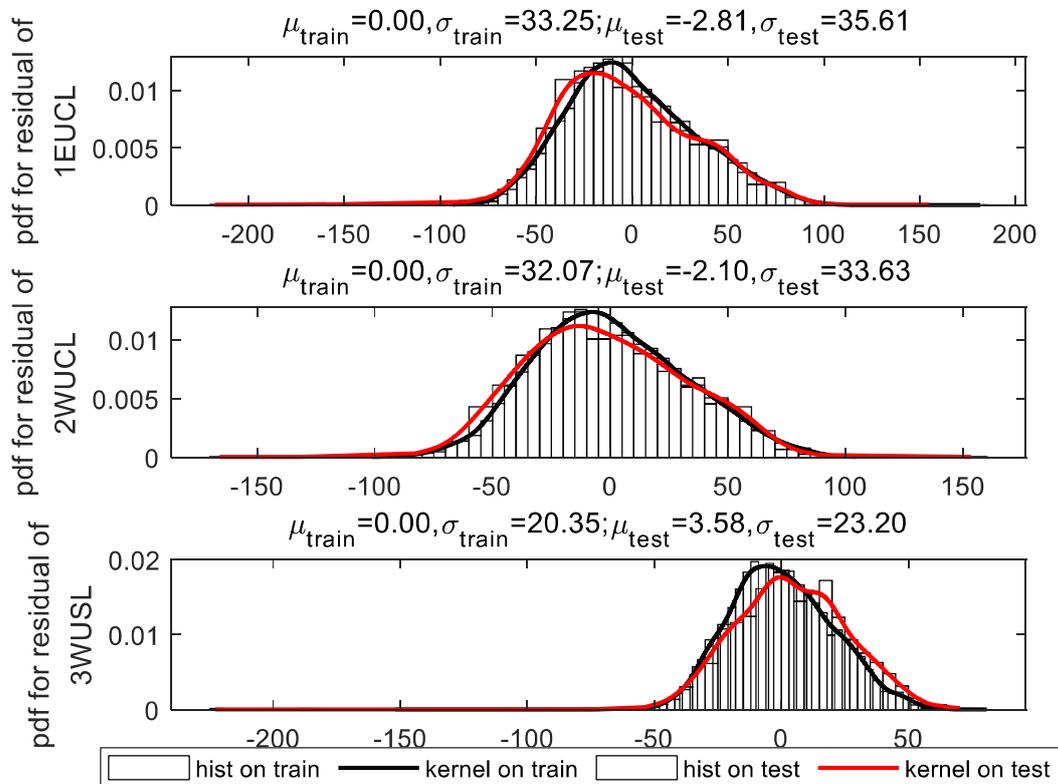


図 5.10 LASSO 回帰による橋軸方向変位の予測誤差分布

3) ガウス過程回帰 (GPR)

橋軸方向変位 (1EUCL, 2WUCL, 3WUSL) に対する風速と温度の影響のガウス過程回帰による予測時系列を図 5.11 に示す. 回帰モデル作成には 2017 年 8 月 1 日から 2018 年 7 月 31 日のデータを学習データとして利用する. ガウス過程回帰モデルを用いて, 2018 年 8 月 1 日以降の変位の予測を行なっている. 図 5.11 の黒点の時系列は観測時系列を示している. 青線は予測時系列を, 緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している. 予測精度を確認するための予測誤差の時系列を図 5.12 に, 予測誤差分布を図 5.13 に示す. 図 5.10 の予測誤差の平均値を見ると 1EUCL については, 学習データについては予測誤差がゼロであり, テストデータについては予測誤差が-3.51, 2WUCL については, 学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと-3.16, 3WUSL については, 学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと 2.35 となっている. 全般的に LASSO 回帰よりは若干予測精度が上がっている.

最小 2 乗回帰および LASSO 回帰の予測誤差が極端に悪いタイミング (2018 年 9 月 1 日前後と 3WUSL については 2017 年 9 月中旬と 10 月初旬前後) については, ガウス過程回帰によって 3WUSL の 2017 年 9 月中旬と 10 月初旬前後の突発的な誤差はなくなっている. さらに 2018 年 9 月 1 日前後の突発的な誤差についても, 最小 2 乗回帰および LASSO 回帰の誤差に比べ誤差の大きさが減少していることが分かる. これは, 4 章でも説明したように, ガウス過程回帰の特徴の一つはその非線形性であり, 線形回帰ではうまくフィッティングできない突発的な変動に対してもある程度対応しているからと考えられる.

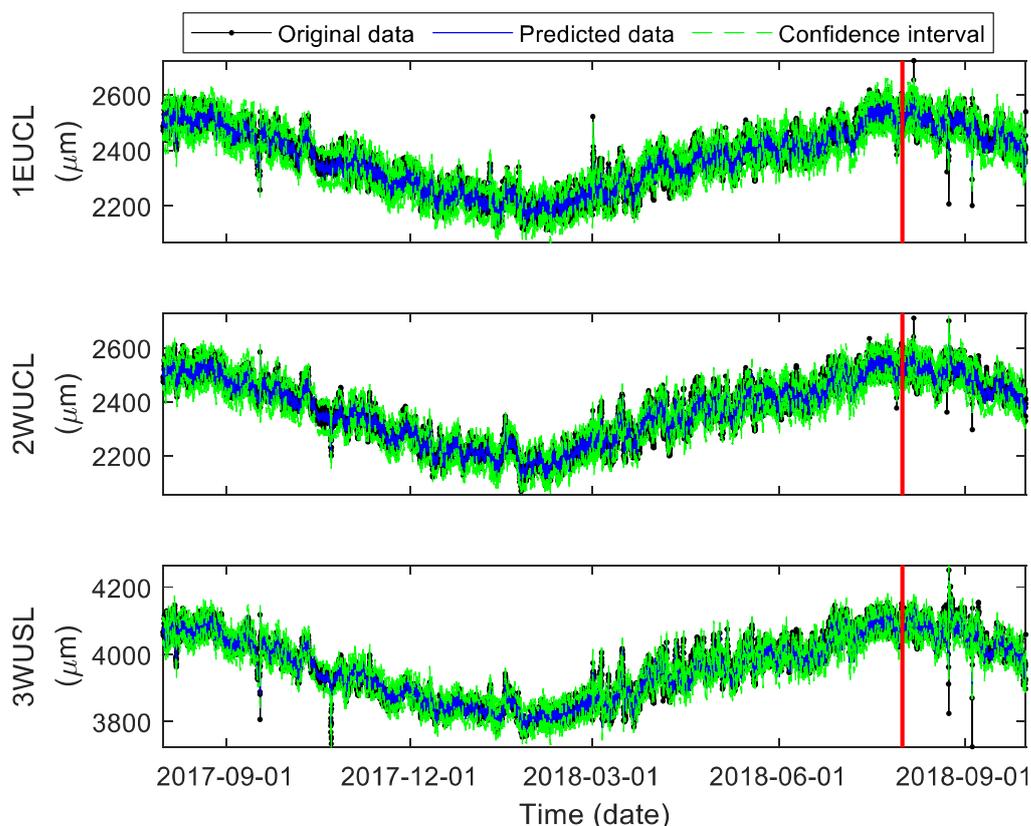


図 5.11 ガウス過程回帰による予測橋軸方向変位

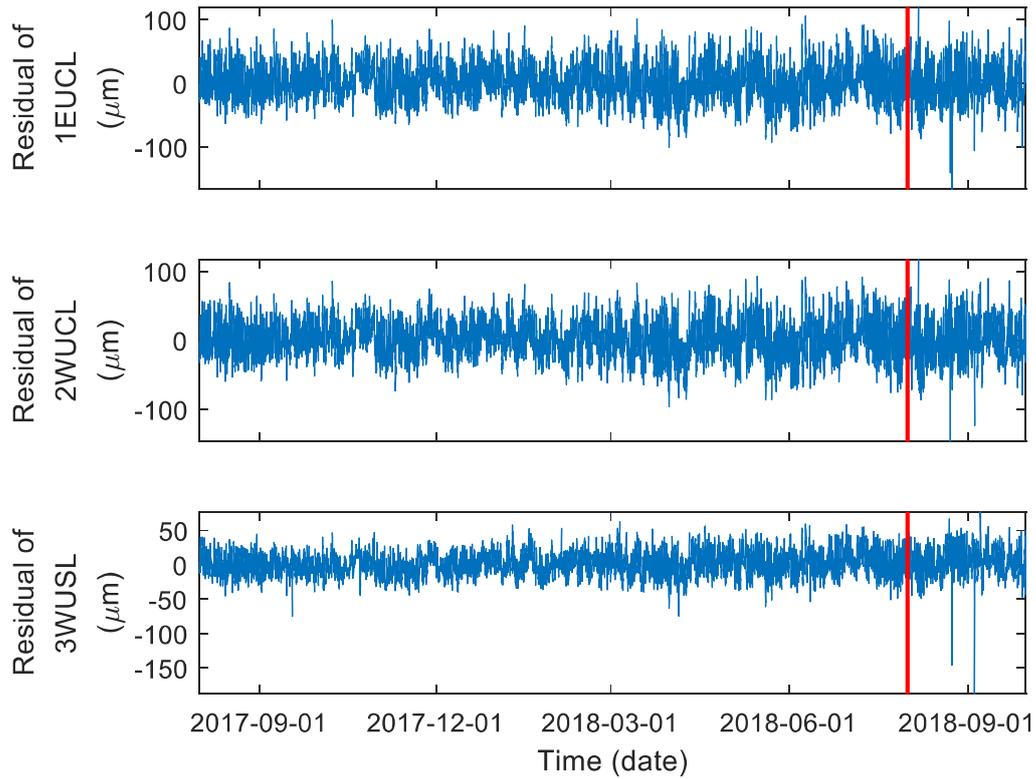


図 5.12 ガウス過程回帰による橋軸方向変位の予測誤差

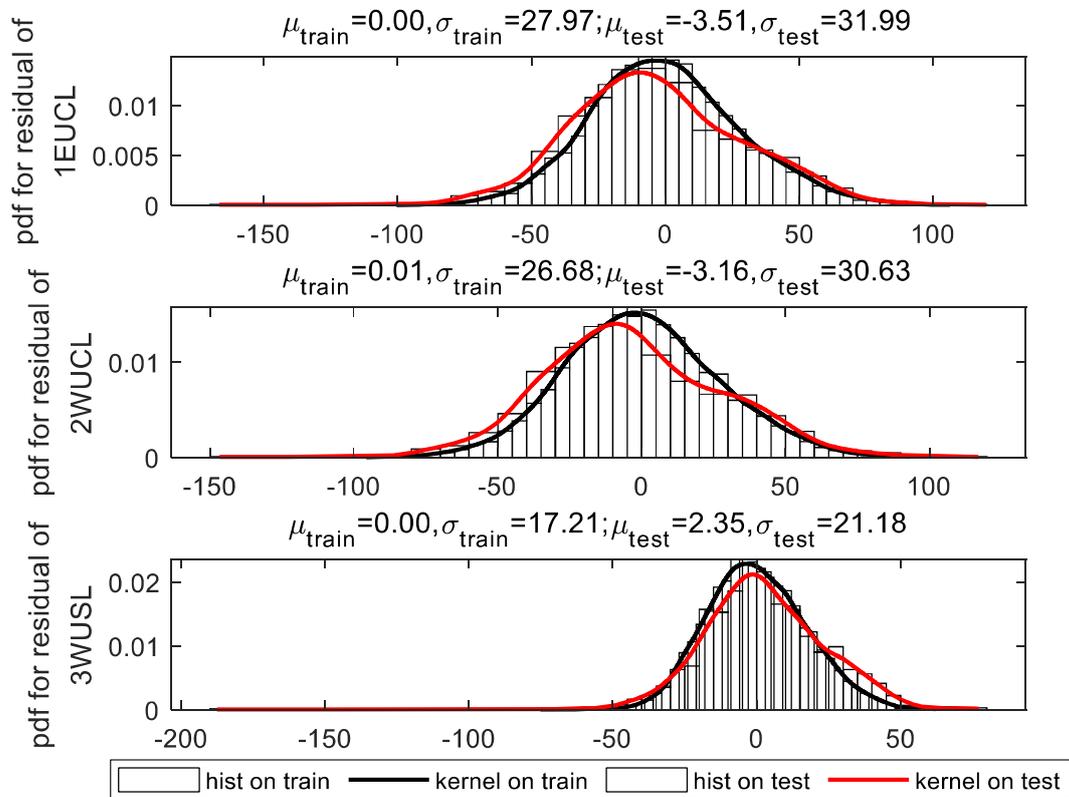


図 5.13 ガウス過程回帰による橋軸方向変位の予測誤差分布

5.3 一般橋の長期計測データの分析

5.3.1 モニタリング概要

対象橋梁は図 5.14 に示す単純 2 主鋼鈹桁橋であり、支間長 40m、桁高 2.0m、有効幅員 4.0m（1 車線）である。1957 年に建設され、2017 年に供用を終了し、翌年に撤去された。幅員拡張や歩道の新設、周辺景観への配慮などの理由で新設橋梁が建設されることとなり、供用終了後の橋梁において、撤去前に損傷実験を行った。

図 5.15 に示す位置に加速度計 10 点（A①～A⑩）を各桁下フランジ内側上面に設置する。支承部の動きを計測するために変位計（D①, D②, D⑤～D⑩：橋軸方向, D③, D④：鉛直方向）、また桁の表面温度の季節変動を計測するために熱電対（T①～T④）をそれぞれ図 5.15 に示すように配置した。実験に際しては、本対象橋梁は既に供用を終え、一般車両通行は新設橋梁へ移行された後に、静的載荷実験および車両走行実験を実施した。静的載荷実験では、点検作業車による影響線載荷を行い、各計測点での変位を計測した。車両走行実験では、実験車両のみの走行により加振される橋梁の鉛直振動を加速度計で計測した。本研究では、振動特性について検討を行うが、静的載荷試験で得られたデータも一部利用するため、本節でその概要を説明する。

模擬損傷は、桁端部のソールプレート近傍の下フランジからウェブプレートにまで進展する疲労亀裂を模擬し、上流側の橋桁を 2 段階に分けてガス切断する。損傷位置と損傷状況は図 5.15、図 5.16 にそれぞれ示す。本損傷実験では、実験時間の制約および実験の安全性を考慮し、片側（上流側）のみに模擬損傷を導入する。模擬損傷を導入するうえで、安全対策として落橋防止装置を損傷導入側端部に図 5.15 に示すように設置した。また、損傷実験中の意図しない亀裂の進展を避けるために、実験前にウェブプレートの亀裂終端位置にストップホールを導入した（図 5.16 参照）。損傷シナリオについて損傷導入前、下フランジ切断後、ウェブプレート切断後をそれぞれ INT, DMG1, DMG2 とする。なお、INT の状態で既に落橋防止装置は設置されている。

車両走行実験における実験車両はワンボックスタイプの車両（トヨタ自動車製）であり、総質量は 3195kg である。走行速度 20 km/h の車両走行による振動実験を行い、図 5.15 に示す 10ヶ所の計測点で橋梁の鉛直方向加速度応答を計測した。サンプリング周波数は 200 Hz、データ長は 15 秒の振動データを各損傷シナリオで 30 回計測した。各振動データは、走行車両が橋梁に進入した時から退出した後の自由減衰振動が収束するまでの間の橋梁の鉛直振動を指す。同一時系列波形内においても、強制振動波形と自由減衰振動波形では、性質が異なることは広く知られている。例えば、自由減衰振動波形に比べて、強制振動波形では高次のモードが卓越する、といったことが挙げられる。本研究では人工損傷による振動数の変化を対象としているため、橋梁の振動モードを幅広く同定するために、強制振動および自由減衰振動を含んだ振動データを用いて検討を行う。なお本研究では、実験車両の振動特性に関する事前検討を行っていないため、実験車両の卓越振動数等は把握していない。また、気温の変化に伴う橋梁の振動特性への温度の影響を考慮するため、各損傷シナリオでの気温を計測し、INT では 29℃、DMG1 では 34℃、DMG2 では 34℃であった。気温の大きな変化は見られないため、本研究では橋梁の振動特性に対する温度の影響は無視できると判断する。

静的載荷試験における実験車両は点検作業車であり、総質量は 7810kg である。前軸には 2210kg、後軸には 5600kg の質量が分配されている。載荷位置は A2 側から 6750mm 間隔の位置に、点検作業車の後輪を設置して載荷した。各損傷シナリオで計 2 回計測した。

2016 年 9 月 1 日から 2017 年 3 月 23 日までモニタリングした温度の時系列の例を図 5.17 に示す。ここに T_1 と T_2 （それぞれ図 5.15 の T①と T②）は主桁の表面温度を表す。また T_5 は対象橋

主辺の気温, T_{ms} は対象橋から 17km 離れた気象観測点の気温を表す。

同じ時期に計測された加速度データから, 第 4 章で説明した BAYOMA により同定された曲げ 1 次から曲げ 3 次までのモード振動数の時系列を図 5.18 に示す。曲げ 1 次振動数の時系列を見ると, 夏から冬へ変わるとつれてトレンドの変化は明確ではないがばらつきの変化が観測される。曲げ 2 次および曲げ 3 次モードの振動数については, 夏から冬冬へ変わるとつれて右上がりの傾向を示している。何れの振動数においても橋梁の振動数の季節変動が確認されている。



図 5.14 モニタリング対象橋 (鋼鉄桁橋)

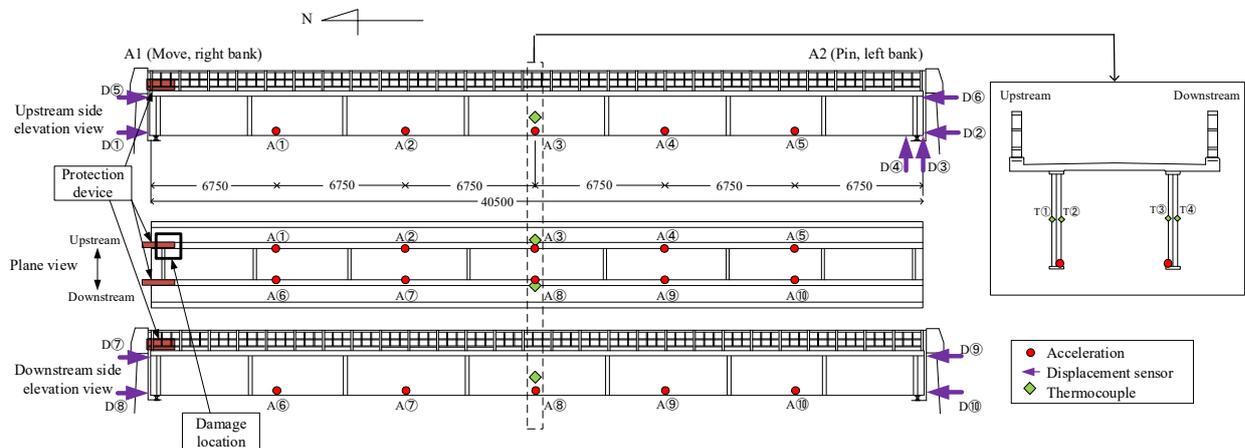


図 5.15 センサ配置

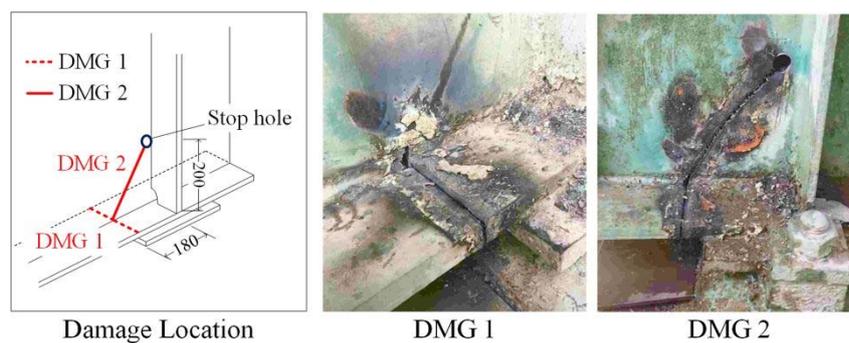


図 5.16 人工損傷

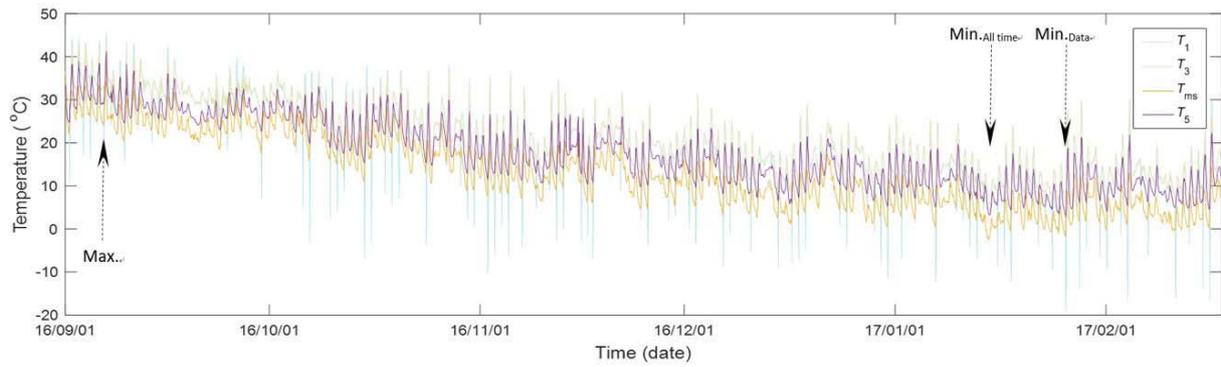


図 5.17 2016 年 9 月 1 日から 2017 年 3 月 23 日までの温度の時系列

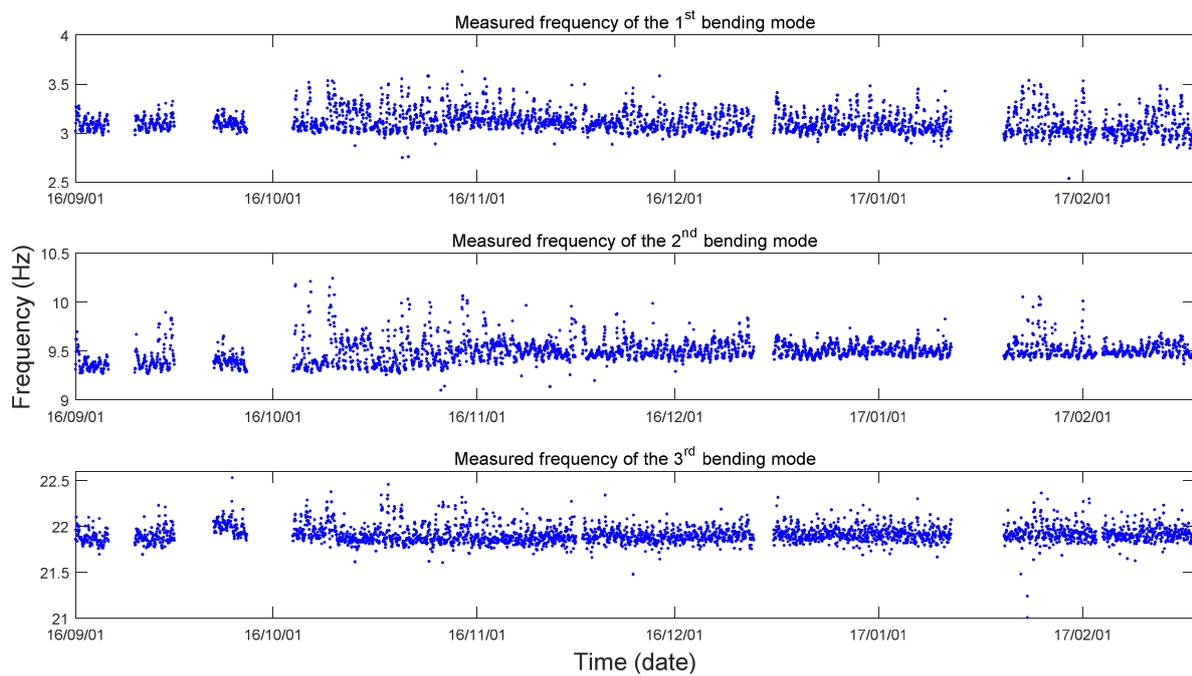


図 5.18 2016 年 9 月 1 日から 2017 年 3 月 23 日までの振動数の時系列

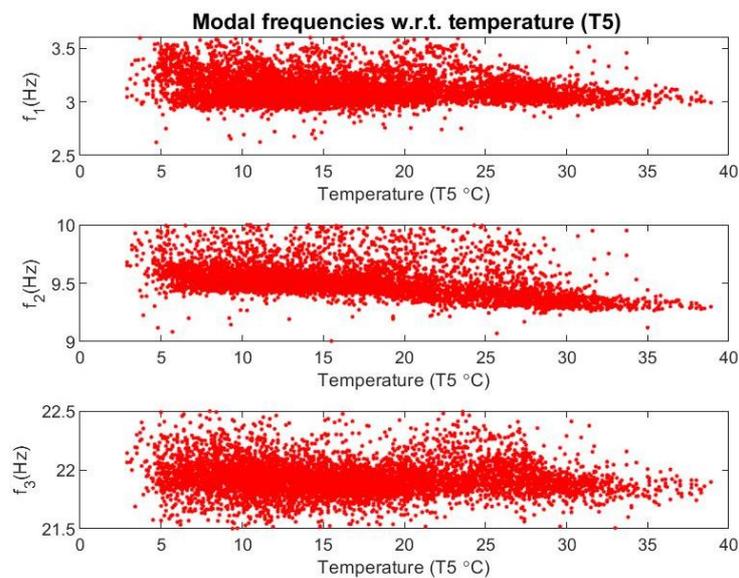


図 5.19 気温と振動数

5.3.2 長期モニタリングの季節変動の回帰分析

橋梁の振動数の季節変動の回帰分析を行い、季節変動の影響の除去を試みる。橋梁周辺の気温(T_s)と振動数をプロットした結果を図 5.19 に示す。曲げ 1 次振動数と気温の関係を見ると、温度のよらつきは大きいものの気温によるトレンドの変化は明確ではない。一方で、曲げ 2 次および曲げ 3 次モードの振動数については、気温の上昇に伴い振動数が低下する傾向を示している。

回帰分析には、2016 年 9 月 1 日から 2017 年 1 月 30 日までのデータを学習データとして回帰モデルの学習に用いる。テストデータとして、2017 年 1 月 31 日から 2017 年 2 月 18 日までのデータを用いる。

1) 最小 2 乗回帰 (OLSR)

前述の通り最小 2 乗回帰モデル作成には 2016 年 9 月 1 日から 2017 年 1 月 30 日までのデータを学習データとして利用する。作成した最小 2 乗回帰モデルを用いて、2017 年 1 月 31 日から 2017 年 2 月 18 日までの曲げ 1 次から曲げ 3 次までの推定振動数の時系列 (f_1, f_2, f_3) を図 5.20 に示す。ここに、黒点の時系列は観測振動数の時系列を示している。青線は振動数の予測時系列を、緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している。予測精度を確認するための予測誤差の分布を図 5.21 に示す。図 5.21 の予測誤差の平均値を見ると f_1 については、予測誤差が -0.0688, f_2 については、予測誤差が -0.0517, f_3 については、学習データとテストデータのそれぞれの予測誤差はゼロと 0.045 となっている。また、曲げ 1 次と曲げ 2 次モードの推定振動数の確率分布はばらつきにより非正規分布になるのが分かる。一方で、曲げ 3 次モードの推定振動数の確率分布は正規分布とみなせる。

予測誤差が突発的に悪いタイミング (予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を超える観測値) が観測される。これは通行交通量の変動によるものであると考えられる。吊り橋のモニタリング結果の考察と同様に、突発的な変動要因は線形回帰モデルには反映されないためその予測誤差が大きくなっていると考えるのが自然である。言い換えれば、突発的な変動要因がないにもかかわらず予測誤差が極端に悪い場合、構造的な異常である可能性を示すものと解釈することもできる。

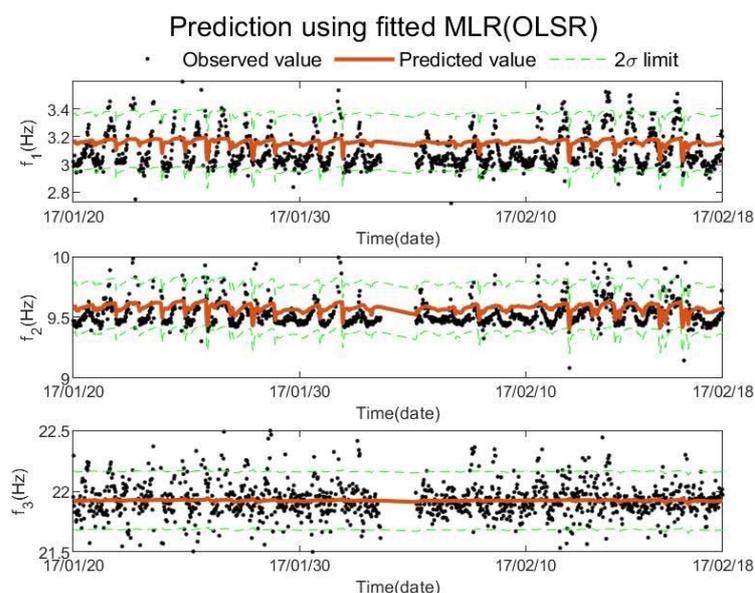


図 5.20 線形回帰による予測振動数

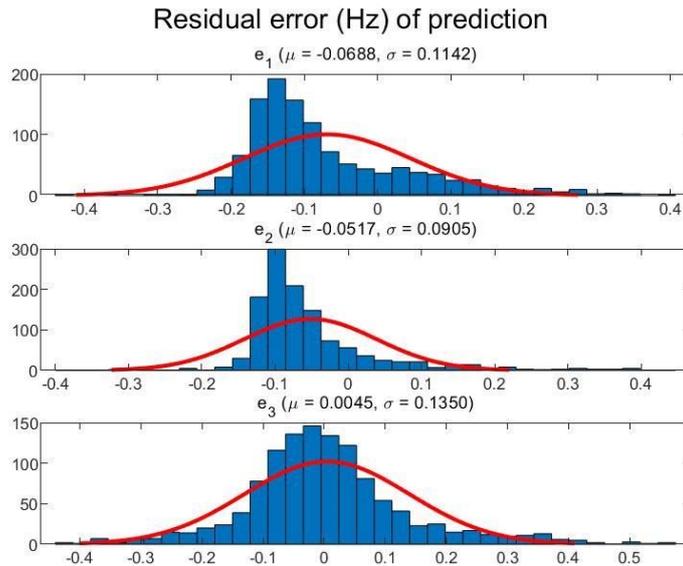


図 5.21 線形回帰による予測振動数の誤差分布

2) スパース回帰 (LASSO)

前述の最小 2 乗回帰モデル作成と同様に 2016 年 9 月 1 日から 2017 年 1 月 30 日までのデータを学習データとして利用し、作成した LASSO 回帰モデルを用いて、2017 年 1 月 31 日から 2017 年 2 月 18 日までの曲げ 1 次から曲げ 3 次までの推定振動数の時系列 (f_1, f_2, f_3) を図 5.22 に示す。ここに、黒点の時系列は観測振動数の時系列を示している。青線は振動数の予測時系列を、緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している。

予測精度を確認するための予測誤差の分布を図 5.23 に示す。図 5.23 の予測誤差の平均値を見ると f_1 については、予測誤差が -0.0625 、 f_2 については、予測誤差が -0.0517 、 f_3 については、予測誤差は 0.0159 となっている。また、曲げ 1 次と曲げ 2 次モードの推定振動数の確率分布はばらつきにより非正規分布になるのが分かる。一方で、曲げ 3 次モードの推定振動数の確率分布は正規分布とみなせる。最小 2 乗回帰結果と比べ LASSO 回帰による精度の向上は特に見られなかった。

予測誤差が突発的に悪いタイミング（予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を超える観測値）が観測されるのは、LASSO 回帰も基本的に線形回帰の概念に基づいており、突発的な変動要因は線形回帰モデルには反映されないためである。

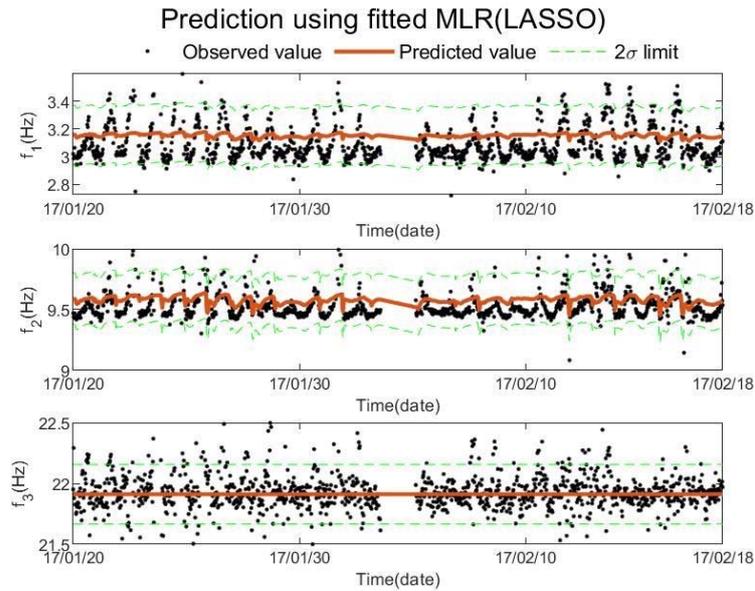


図 5.22 LASSO 回帰による予測振動数

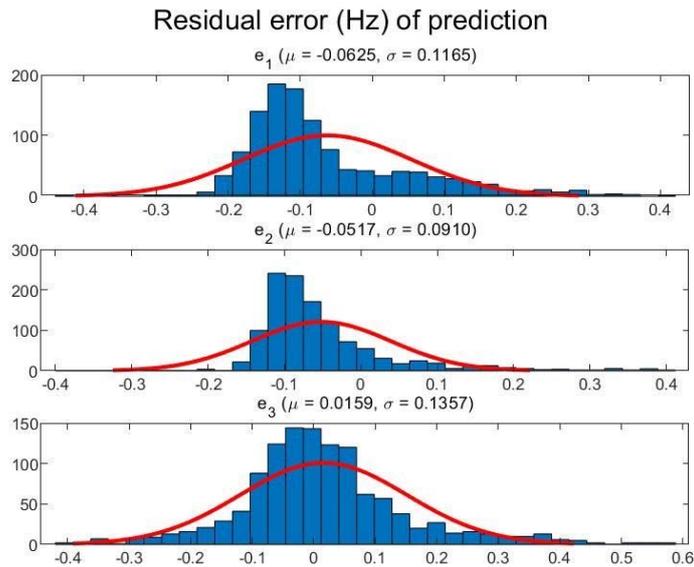


図 5.23 LASSO 回帰による予測振動数の誤差分布

3) ガウス過程回帰 (GPR)

曲げ 1 次から曲げ 3 次までのガウス過程回帰による推定振動数の時系列 (f_1, f_2, f_3) を図 5.24 に示す。ここに、黒点の時系列は観測振動数の時系列を示している。青線は振動数の予測時系列を、緑の波線は予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している。

予測精度を確認するための予測誤差の分布を図 5.25 に示す。図 5.25 の予測誤差の平均値を見ると f_1 については、予測誤差が -0.1036 、 f_2 については、予測誤差が -0.0506 、 f_3 については、予測誤差が 0.0202 となっている。誤差分布を見ると、曲げ 2 次モードの推定振動数の確率分布は非正規分布になるのが、曲げ 1 次と曲げ 3 次モードの推定振動数の確率分布は正規分布とみなせる。これは、予測誤差が突発的に悪いタイミング (予測時系列の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を超える観測値)

が減ったことに起因する。ガウス過程回帰の特徴の一つである非線形回帰の性質により突発的な変動に対してもある程度対応しているからと考えられる。

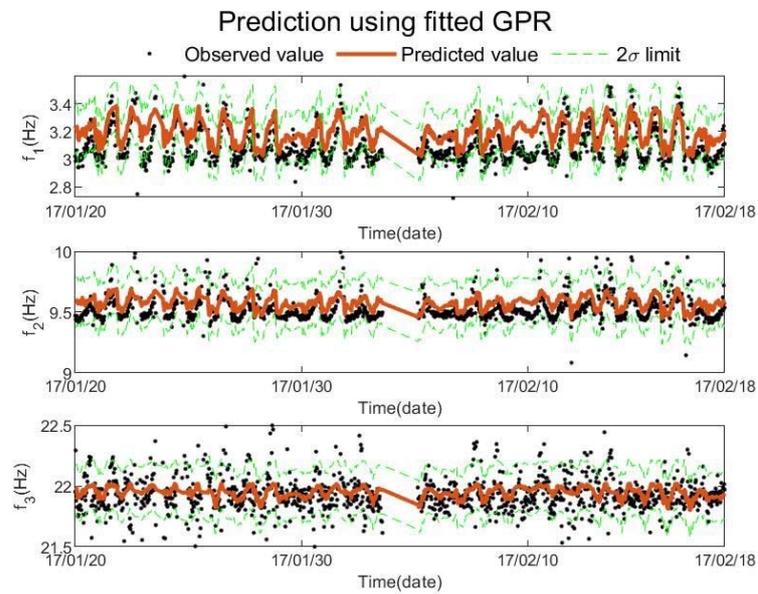


図 5.24 ガウス過程回帰による予測振動数

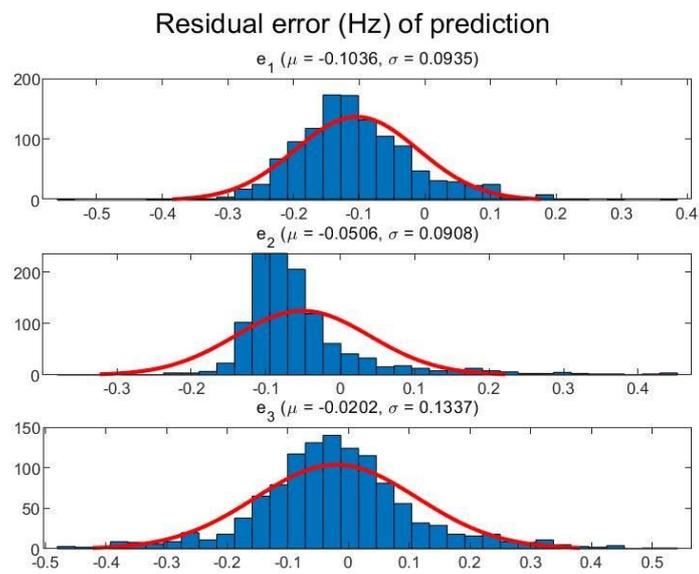


図 5.25 ガウス過程回帰による予測振動数の誤差分布

5.4 季節変動の回帰モデルによる異常検知への試み

5.3 で検討した振動数と気温との回帰モデルを用い、人工損傷による損傷実験で計測された振動数の予測を行なった。予測には損傷実験の際の気温を入力している。予測誤差が大きくなれば異常を意味する。

図 5.26 に橋梁の損傷状態毎の計測曲げ 1 次振動数と予測振動数の平均と $\pm 2\sigma$ の信頼区間を示している。予測には、LASSO 回帰、ガウス過程回帰 (GPR) に加えてベイズ回帰 (BLR) 結果を示している。損傷がない INT については、LASSO 回帰がガウス過程回帰 (GPR) とベイズ回帰 (BLR) に比べ予測精度が良い結果となった。損傷に対する異常検知については、特に損傷状態が厳しい DMG2 を検討すると、計測振動数が全ての回帰モデルによる予測振動数の $\pm 2\sigma$ の信頼区間を超えており、何らかの異常が起きていることを示している。ただし、INT の予測精度を勘案して、損傷の異常検知精度を評価すると、ガウス過程回帰 (GPR) に加えてベイズ回帰 (BLR) が異常について LASSO 回帰のより過敏に異常を示す結果となった。

曲げ 2 次モード振動数の損傷がない INT については、図 5.27 に示すように LASSO 回帰とガウス過程回帰 (GPR) による予測精度が良い結果となった。損傷の異常検知精度を評価すると、LASSO 回帰が他の回帰より過敏に異常を示す結果となった。

曲げ 3 次モード振動数の損傷がない INT については、図 5.28 に示すようにいずれの回帰モデルも同等の予測精度を示す結果となった。損傷の異常検知精度を評価すると、LASSO 回帰が他の回帰より過敏に異常を示す結果となった。

ただし、どの回帰モデルでも特に損傷状態が厳しい DMG2 の異常検知に成功していることがわかる。

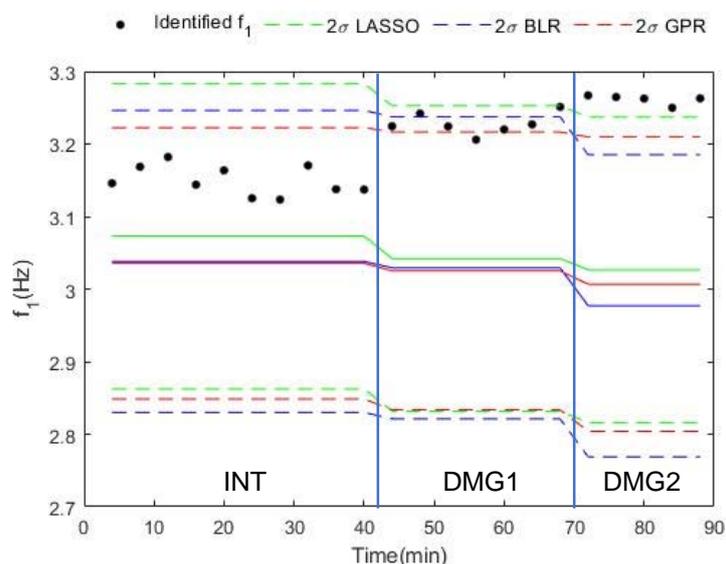


図 5.26 季節変動の回帰モデルによる損傷実験の曲げ 1 次振動数予測

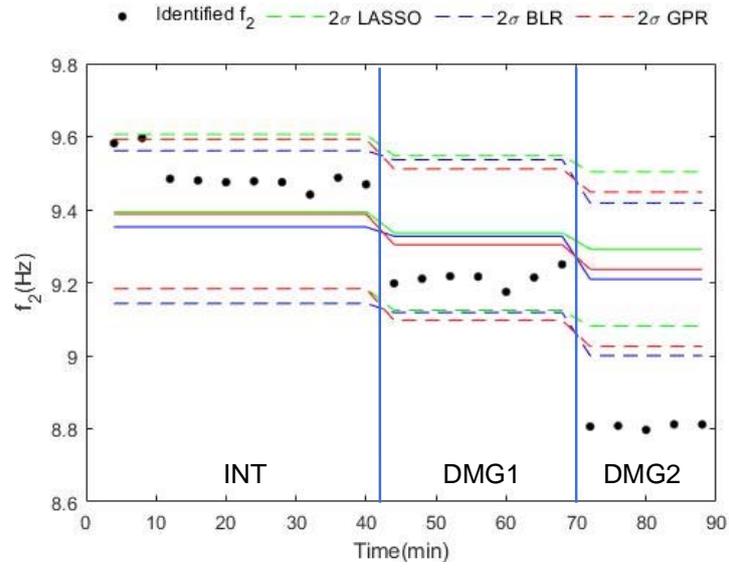


図 5.27 季節変動の回帰モデルによる損傷実験の曲げ 2 次振動数予測

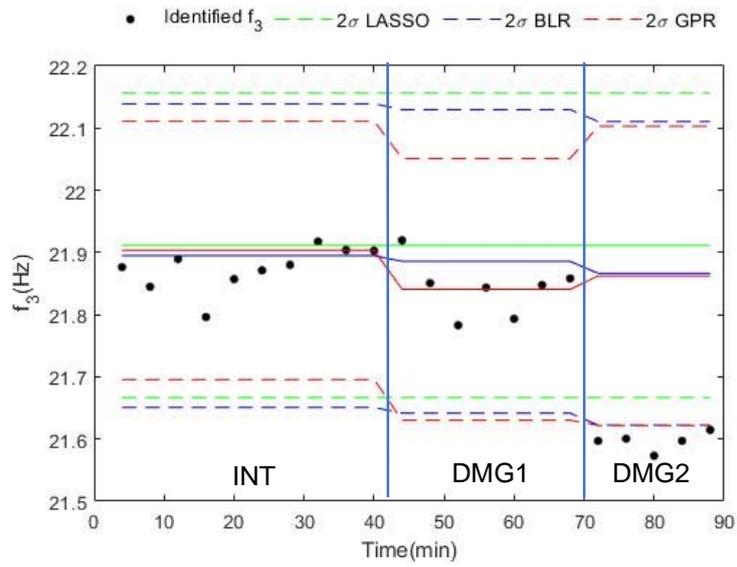


図 5.28 季節変動の回帰モデルによる損傷実験の曲げ 3 次振動数予測

5.5 まとめ

本章では、吊り橋の長期モニタリングにおける変位の長期にわたる変動と風速、気温の変化などの環境要因との関連性の検討と、回帰モデルによる季節変動の影響の除去について検討を行った。また、一般橋の振動モニタリングによる異常検知における季節変動の影響の検討を行った。

吊り橋の季節変動の検討においては、モニタリング対象の特徴量である変位と温度、風速、風向の強い相関から回帰モデルの構築には温度、風速、風向を考慮する必要があることが分かった。特に加速度は変位の時間に対する 2 回微分であることを考えると振動モニタリングにおいても同様な傾向があることが予測できる。

長期モニタリングにおける突風や交通パターンの違いによる突発的な現象については、非線形回帰であるガウス過程回帰によるその予測精度の向上が期待できることが分かった。

第 6 章 研究会議事録

新都市社会技術融合創造研究会
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
第1回会議議事録

日時：令和元年8月8日（木）10：00～12：00

場所：大阪合同庁舎第1号館第一別館 203 会議室

出席者：八木、金、五井、玉越、森田、上原、濱本、坂本、高祖、遠山、織田、榊、三輪、小野（記録）
（敬称略、順不同）

配布資料：1-0 議事次第

1-1 「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト概要

1-2 「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
年度別の研究内容

1-3 プロジェクトチームメンバーリスト

1. プロジェクト構成員の紹介（資料1-3）

（金教授）

現状、本研究会のプロジェクトチームメンバーは、メンバーリストのとおりである。なお、日本橋梁建設協会及び橋梁メーカー等からの参画を調整中である。

*各委員からの自己紹介

2. 本会の趣旨説明及び研究内容の紹介（資料1-1）

（金教授）

【研究目的】

本研究プロジェクトの目的は、ケーブル構造を持つ特殊橋について利用可能な計測データ及び目視点検記録から特殊橋の維持管理に必要な有益な情報の抽出と橋梁条件や架橋条件、着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界の明確化を図り「特殊橋の劣化性や実態を精査した情報の確保による維持管理手法の検討」を目的としている。

現状、中小スパン橋の維持管理も種々の問題があるが、長大橋に関しては更なる問題が山積している。これらの問題の解決に繋がる研究としていきたい。

【研究内容】

① ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査

本州四国連絡高速道路株式会社が保有しているケーブル構造の特殊橋の点検データを活用し、特殊橋における劣化特性や実態を精査し、定期点検の限界を把握する。

② ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査

本州四国連絡高速道路株式会社が保有しているケーブル構造の特殊橋のモニタリングデータの実態を精査し、維持管理に有用なモニタリングデータについて調査及び整理を行う。これによって特殊橋モニタリングのための問題点や改善点を把握する。

③ 長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備

ケーブル構造の特殊橋の長期のモニタリングデータから橋梁の健全性に関わる特徴量の効率的な抽出法を整備し、特徴量としてのモード特性のみならず中小スパン橋梁の異常検知で適用された特徴量の特殊橋のモニタリングへの適用性について検討を行う。

④ 長計測データにおける季節変動の調査

長期モニタリングにおける特徴量の長期にわたる変動と風速、交通量、気温の変化などの環境要因との関連性を調査する。

【期待される成果】

- ・蓄積された長大橋の維持管理・計測データの有効活用
- ・ケーブル構造を持つ特殊橋の劣化特性や実態に関する情報確保による維持管理指針の提案
- ・自治体の特殊橋の維持管理へのフィードバック
- ・他の形式の橋梁の維持管理・モニタリングへのフィードバック

なお、長大橋のモニタリングデータは過去から蓄積されており、そのデータの分析が可能であるが、中小スパン橋のデータは蓄積されていないのが現状である。今後の研究においては、長大橋のモニタリングデータを分析し、中小スパン橋のモニタリング手法を検討に活用できると考えている。

3. 本年度の研究方針（資料 1-2）

（金教授）

本研究会は、本年度から2022年3月までの3年間の予定である。

本年度の研究内容としては、各種調査をメインとすることを考えている。具体的には下記のとおりである。

- 令和元年度
 - ・ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査
 - ・ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査
 - ・長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備
 - ・長期計測データにおける季節変動の調査

来年度以降は、下記のとおりである。

- 令和2年度
 - ・定期点検の限界を補足できる条件の検討
 - ・特徴量と目視点検データとの相関検討
 - ・長期計測における季節変動成分の除去法の構築
 - ・モニタリングによるケーブルと定着部の腐食・破断検知法について検討
- 令和3年度
 - ・橋梁条件や架橋条件、着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界について検討・整理
 - ・センサー情報による橋梁維持管理への支援策
 - ・ケーブル構造を持つ特殊橋梁の維持管理指針の提案

以上の研究内容を踏まえ、現状の課題、問題点等、ご意見を頂けないか。

4. メンバーによる意見交換

（玉越氏）

・国が法令化した5年に1度の橋梁定期点検は、近接目視やたたき調査等を全ての橋梁に実施するように規定した。なお、2巡目に入る際に「5年前に対象となった橋梁に対して同様の調査が必要なのか？」というような議論をしたが、万が一、落橋との被害が生じた場合、管理者として責任を負うこととなり、点検内容を簡略化することはできないということで、現在も同様に点検が行われている。

・なお、現在、国総研において下記の共同研究の公募を行っており、一般橋梁と特殊橋梁の点検及び維持管理に向けての研究が開始される予定である。

■ 特殊橋・長大橋のマネジメントに関する共同研究

■ 既設道路橋群の維持管理計画の継続的改善に関する共同研究

・今回の研究の対象であるケーブル構造の橋梁は、ケーブルが破断しない限り落橋はしない。ただし、

長大橋におけるケーブルの全てを詳細点検し、損傷度合いを確認することも多大な労力が掛かるとともに損傷を見つけることも困難である。それに対応し、センサー設置により確実に破断を確認することも難しい。したがって、特殊橋に対しては、どの部位を詳細点検により確認し、どの部位は簡素化した点検でいいのかということ学術的な知見から整理をする必要がある。

・また、ケーブル構造の橋梁は、自治体が多く管理している。それら管理者が抱えている現状の課題・問題点等も明らかにしていく必要がある。

(八木教授)

・ケーブル構造は比較的モニタリングがしやすいが、どの部位をモニタリングするのかは、構造的に問題となっている箇所等を選定する必要がある。

(金教授)

・ケーブルが損傷を受けた橋梁に対する研究はないか？

(榊氏・三輪氏)

・確定はできないが何かしらあるのではないかとと思われる。

(八木教授)

・今回の研究で本四から提供頂くモニタリングデータは、ケーブルの劣化等の影響は恐らくないものと思われる。そのため、季節変動の影響を明確にし、それを除去する手法の参考となるかと思われる。なお、別途、劣化の影響を受けた橋梁を探しモニタリングをすることも必要である。

(遠山氏)

・本四では建設時からセンサーを設置している。この計測結果から、設計で想定した挙動が確認されたこと、更新時期になってきていることから、10年前くらいから整理、数を少なくしていつている。これまで蓄積したデータのうち、明石大橋のデータ等も確認し、本研究会で使用できるデータを整理し報告する。

(玉越氏)

・ケーブルは、基本劣化しない、腐食するだけである。しかし、その腐食を詳細調査で見つけることは困難である。そのため、予防保全としてどのレベルで、どのような対処を行うかを把握することが必要である。

・ケーブル定着部の内部の状況をどう把握するか？なお、ケーブルは、素線が1本2本切れても直接落橋には繋がらない。また、安全率の関係でケーブルが1本切れてもすぐに落橋するわけではない。そのため、素線が全て破断する前の状態を把握することで最悪の事態（落橋）を避けるというアプローチの仕方も考えられる。

(八木教授)

・以上の点を踏まえると、モニタリングをしたとしても落橋する手前でしか確認できないがそれでも意味はあるか？

(玉越氏)

・それはそれで意味はあると思われる。

(金教授)

・少ないセンサーでのモニタリングで確認でき得る範囲で対応するしかないと思われる。

・加速度計で素線の破断は確認できるかと思われるが、対象箇所全てに設置するとなると大変である。

(玉越氏)

・今回は、そこまでは気にしなくていい。“何がどうなったら、どのようになる”という点を確認すればいいのではないかと考える。

・来島海峡大橋では、測量を繰返し行っている。その計測結果で異常を確認している。

・海外のケーブル構造の橋梁でも常時観測を行っており、異常値が出ない限り簡易な点検で対応している。

(金教授)

以上の意見交換を踏まえ、以下の内容について検討していく。

■実態調査をメインとして実施する。

- ・管理者、行政のニーズを確認
- ・現状、何が問題・課題となっているか？
- ・点検の手法等

■検討に用いるDATAの精査

また、自治体もメンバーに加える予定である。

宇治市・京都市・京都府・奈良県・和歌山県・兵庫県等が候補である。

5. 次回開催予定

(金教授)

次回会議は、10月を予定している。詳細は追って調整する。なお、次回会議までに、特殊橋の点検手法の問題点・ニーズ等を整理する。

9月末には、整備局から自治体からの意見等のまとめを配信する。

6. その他

(金教授)

本研究会の幹事は下記とおりとする。

- ・(株)長大；丸山氏
- ・(株)エイト日本技術開発；小野氏

— 以上 —

新都市社会技術融合創造研究会
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
第2回会議議事録

日時：令和元年10月30日（水）10：00～12：00

場所：京都大学桂キャンパス C1棟152号室

出席者：八木、金、五井、河合、吉津、森田、高祖、遠山、榊、三輪、小野、織田、丸山（記録）（敬称略、順不同）

配布資料：2-0 議事次第

2-1 第1回研究会 議事録

2-2 資料収集・整理に関して

2-3 ケーブル構造を持つ特殊橋に対する聞き取り調査結果

2-4 長崎県橋梁長寿命化修繕計画

2-5 本四高速が保有する長大橋動態観測データについて

1. 第1回研究会の議事内容の確認（資料2-1）

（金教授）

第1回研究会後に実施した幹事団の会合の結果、幹事団の役割分担としては、連絡調整はエイト日技、議事録作成は長大を主として実施することとした。

*小野氏より第1回研究会の議事内容について説明があり、各メンバーからの承認を受けた。

2. 自治体聞き取り調査結果の確認（資料2-3）

*丸山より聞き取り調査結果の概要説明を実施した。

（金教授）

今回のヒアリングで問題点は明らかとなった。本四高速道路株式会社（以下、“本四”と略記）でどのような点検やモニタリングを実施しているかが参考となるのでは。自治体から挙がっている課題に対して現状の技術で対応可能なものはなにかを探っていく必要がある。

（遠山氏）

本四の吊橋・斜張橋では近接目視を基本として点検を行っている。吊橋のハンガーロープに関しては、全磁束法で内部の腐食による断面欠損の有無を調査している事例がある。

吊橋のメインケーブルに関しては、10年に1回程度、ケーブルの被覆を除去した上で目視にてケーブル素線の目視確認を行っている。ケーブルの芯までは目視確認していないが、ケーブル内部の水分が蓄積されやすい傾向にある中央径間中央付近について調査を行っている。

吊橋のケーブルについては、ケーブル送気システムによりケーブル内部の湿度を40%以下に保つことを目標に管理しており、システムが正常に機能していれば、日常の点検としては外観目視（さび汁が生じていないか）で良いと考えている。

“本四”の点検要領に点検項目および重要度に応じた点検箇所等をまとめたものがある。

（八木教授）

大鳴門橋のハンガーロープは、非破壊検査（全磁束法）で検査をしており、吊り橋のメインケーブル等は、送気システムの使用と水のたまりやすい表面部分の近接目視で問題ないと判断できる。

（金教授）

本四の点検マニュアルを自治体に対して提示し、流用できるか聞き取りを行うことも考えられる。

（河合氏）

自治体の橋梁は、定期点検要領に基づく5年に1回の点検を実施している。近畿地整直轄の橋梁については、道路巡回により常時状況の把握に努めているが、自治体では巡回するという事はあまりしていないのではないか？

(河合氏)

橋梁の現状が危険かどうかの判断がつきづらい。こういうときは詳細調査が必要とか、緊急時にどこから見ればよいかとか、最低限この点は調査が必要である等を明確することが必要ではないか。調査項目を複雑にすると自治体では使いづらいものとなるのでは。

(金教授)

まずは本四の点検項目等をベースとしてこれだけは点検・調査するというのを選定できればよいが。

(八木教授)

ターゲットを長大橋とし、そのデータを使いながら自治体が橋をモニタリングしていくことができるようにすることが目標である。

最終的には何か一つのセンサーを置いておけば、対象橋梁の問題がわかるという状態に持っていくのが目標となる。そのためには、どの点を見ればおいか、アウトプットとしてどこに一番影響が生ずるかを明らかにしていく必要がある。

(金教授)

橋をモニタリングしていくには、どの位センサーを用いればわかるのか。災害発生時等の意思決定にも使えるような情報が得られるようにしたい。特殊橋梁を多く抱える阪神高速道路株式会社や大阪市に本研究会に参加してもらうのも一案ではないか。

3. 今後のプロジェクトの進め方（資料2-2）

(1)対象とする構造形式（範囲）の確認

*丸山より対象となる構造形式に関する概要説明を実施した。

(河合氏)

本研究の公募段階においては、“1）斜張橋および吊り橋に限定（鋼、コンクリートで範囲を限定しない）”および“3）近畿地整および管内自治体のニーズを調査して決定する”を対象と考え、応募している。まずは斜張橋および吊橋に限定して研究を進めればよいと考える。その後、他の形式に拡大していけばよい。

(八木教授)

関西道路研究会（以下、“関道研”）において、トラス橋等に注目した同様の研究を行っている。そのため、本研究会ではケーブル構造のみを対象とすればよい。

(金教授)

ケーブル構造（斜張橋・吊り橋）を基本として研究を実施する。研究対象は、ケーブル形式の橋梁部材全般かケーブル部材（ケーブルおよび定着部）のみに限定するのか。

(八木教授)

ケーブル構造の橋梁は、ケーブルが損傷すれば大きくリダンダンシーが低下する。そういう意味では破壊モードに着目して考えることが有効である。通常の桁橋であれば桁が主となるが、斜張橋なら一番周期が長いモードとなるケーブルの振動がメインとなると想定される。そういう意味では、ケーブル部（ケーブルおよび定着部）に着目すればよいと考える。ケーブルの構造ということであれば、ニールセンローゼ桁橋も同じと言えるかもしれない。

(金教授)

ニールセンローゼ橋もいれてもよいが、まずは、斜張橋および吊り橋に絞って研究を行い、結論が出た段階で対象橋梁を広げていけばよいと考える。その範囲の中で“本四”のデータの活用を図る。

*PC斜張橋やPCエクストラードスト橋等のコンクリート橋も対象にするのかという質問に対して

(三輪氏)

鋼斜張橋とPCエクストラードスト橋では、ケーブルの設計における安全率が違うことと、変動応力度成分の大きさが異なることが大きな差異と考える。

(金教授)

大きな話としては、斜張橋の形式を限定するものではないが、観測データが本四提供の鋼橋のみのため、まずは鋼橋に限定して進めることとなると考える。また、自治体のニーズも考慮すればよいと考える。

(2)本州四国連絡高速道路(株)における長期計測データの確認 (資料 2-5)

*遠山氏より資料 2-5 についての概要説明を実施した。

(遠山氏)

明石海峡大橋が観測データも多く、台風通過前後の挙動等も記録されているため、本研究に使用しやすいのではないかと考えている。多々羅大橋のデータは、レインバイブレーション等のケーブル振動に特化した計測データとなっている。

(金教授)

明石海峡大橋の解析モデルを提供してもらい、京都大学が解析を行いたい。それと計測データとの比較を行い、ケーブル損傷の有無により振動特性の変化等を解析的に追ってみることも重要と考える。ただし、自治体の中小ケーブル形式橋梁と明石海峡大橋ではスケールが大きくなるため、ダウンサイジングが必要である。

中小のケーブル形式橋梁の計測も行う必要がある。その場合の計測箇所としては、桁、塔、ケーブルのどこに着目するか。研究会の予算の中で計測を行えばよいが。

(金教授)

明石海峡大橋の解析を京都大学において実施する。詳細なデータ（諸条件等）を“本四”より提供して頂く。本解析は自治体が有する対象の橋梁とは規模が大きく異なることから、直接的に適用できない可能性もあるが、計測データの活用を図るためには必要不可欠であるため、実施する。

(3)近畿地整および管内の自治体が保有するケーブル構造を有する橋梁の調査等

*丸山より概要説明を実施した。

(河合氏)

近畿地整で有するケーブル形式の橋梁は、姫路河川国道事務所のカラウコ橋 1 橋である。現在、自治体としては、京都府、奈良県、和歌山県にヒアリングを実施している。

対象橋梁の橋梁台帳、点検調書等のデータについては、上記の 3 自治体を対象として調査を行う。まずは、近畿地整で管理しているロングリストについて上記 3 府県の情報を提供する。その内容を確認の上、必要なデータを改めて、各府県に依頼する。

(金教授)

京都大学は奈良県と協定を結んでいるため、奈良県の担当者にデータ提供について依頼する。

(八木教授)

“関道研”において、全自治体にヒアリングしたものを整理した結果があるので、情報を提供する。

(4)その他、文献調査等

*丸山より概要説明を実施した。

(金教授)

香港においてモニタリングを実施している橋梁が存在している。研究者へ研究データの提供を依頼し

てみる。その内容を本研究会の参考とすればよいと考える。

(5) 今後の検討項目(案)

*丸山より概要説明を実施した。

(金教授)

今後、資料収集・整理を進めた上で、検討項目の整理を行っていく。

4. 長崎県橋梁長寿命化修繕計画の紹介（資料 2-2）

*丸山より概要説明を実施した。

(金教授)

各橋梁独自の維持管理要領は入手できないのか。

(丸山)

現在、長大から長崎県に、研究会で各橋梁の維持管理要領を参考として提示が可能か確認中である。確認が取れれば、提示する予定である。

5. その他

(金教授)

次回研究会は来年の1月中に実施する予定である。それまでの間はメール等により活発に議論を行っていきたい。

次回研究会までに幹事団にて報告書内容（案）を作成して提示する予定である。

(高祖氏)

本研究会では以下のスケジュールで対応が必要となる。

1月末～2月末 アドバイザー会議にて研究状況報告

3月末 本研究会成果報告書（A4キングファイル3cm～4cm程度1冊）を基に竣工検査の実施

— 以上 —

新都市社会技術融合創造研究会
「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
第3回会議議事録

日時：令和2年1月17日（金）10：00～12：00

場所：京都大学桂キャンパス C1棟会議室（C1-152）

出席者：金、八木、玉越、吉津、森田、高祖、織田、榊、小野（記録）（敬称略、順不同）

配布資料：3-0 議事次第

3-1 第2回研究会議事録

3-2 幹事団会合記録簿

3-3 近畿管内の特殊橋梁（吊り橋及び斜張橋）の実態

3-4 アドバイザー会議資料

1. 第2回研究会の議事内容の確認（資料3-1）

（織田氏）

第2回研究会の議事内容について説明があり、各メンバーから承認を受けた。

2. 幹事団会議の事前協議内容の報告（資料3-2）

（金教授）

本年度の研究内容は、下記のとおりであった。

- ① ケーブル構造の特殊橋梁の劣化特性や実態の精査
- ② ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査
- ③ 長大橋の長期計測データ分析に向けたデータ解析手法の整備
- ④ 長期計測データにおける季節変動の調査

①について

整備局提供の資料をもとに整理を行う。なお、損傷が確認されている橋梁については、点検調書を提供頂き損傷状況の把握を行う。

また、自治体のヒアリング結果を踏まえ、点検マニュアル的な資料を作成する。

②について

姫路河川国道管理のカラウコ大橋を対象に、来年度モニタリングを行う。また、モニタリングでは画像解析による振動数把握も行う。なお、可能であれば載荷実験と固有値解析を併せて実施し、載荷実験結果との検証を行う。さらに、その結果を用いてケーブル損傷時の振動数の変化等が把握できればさらに良い。

また、同事務所管理の有年橋での観測データ等も引用して整理していくものとする。

③④について

本四の観測データを用い、今後、大学で検討する予定である。なお、香港から長期モニタリングデータ（風速、交通量、振幅等）を入手できる予定である。

本年度の作業としては、観測データの収集までとし、来年度以降に観測データから季節変動について調査、除去方法の構築を行っていく予定とする。

その他

本年度の委託費用にて、来年度のデータ計測のためのセンサーやモニタリング用のNASサーバー等を購入する予定である。

(玉越氏)

成果品の内容について、契約上の制約等はあるのか。

(吉津氏)

研究内容に関して、十分な内容が整理されていれば契約上の問題はない。

(玉越氏)

取りまとめ内容は、初年度の研究内容に沿っているが、本研究の最終的な目的に達するのかが少々疑問である。研究の方向性をもう少し明らかにして、来年度の研究に繋がる内容で取りまとめるのが良い。

(金教授)

今後、2月10日にアドバイザー会議が実施される予定であり、1月24日には会議に向けた資料提出の必要がある。先に説明した研究内容に加え、来年度の計画を盛り込んで資料作成を行う。

3. ケーブル構造の特殊橋梁の劣化特性や実態の調査結果の報告（資料 3-3）

(小野)

昨年、整備局から提供頂いた管内における特殊橋梁の情報をもとに、「吊り橋」及び「斜張橋」に関してデータを整理した。

なお、直轄管理の特殊橋梁は3橋であり、うち1橋は姫路河川国道事務所が管理する斜張橋（国道29号カラウコ大橋）である。

今回整理した結果は以下のとおりである。

【吊り橋】

吊り橋は200橋架橋されており、和歌山県が最も多く132橋、奈良県56橋、京都府12橋となっている。それらの供用年数は、75%程度が50年を超えており、最も古い橋梁で93年の供用年数となっている。

損傷判定区分がⅢ及びⅣとなっている橋梁は、68橋であり全体の35%程度である。なお、生じている損傷は、主索及び吊策等の破断、腐食である。

【斜張橋】

斜張橋は10橋架橋されており、京都府5橋、和歌山県4橋、奈良県1橋となっている。それらの供用年数は、概ね30年程度であるが1橋のみ87年経過しているものがある。この橋梁については、本来の斜張橋であるのかは少々疑問である。

損傷度判定はⅢ及びⅣとなっている橋梁は、1橋で定着部の腐食が確認されている。

以上、提供頂いた資料からは、この程度の整理しかできないことから、来年度に向けて損傷判定Ⅲ及びⅣが確認されている橋梁の点検調書を頂きたい。その情報をもとに、損傷部位の分析等を引き続き実施していく予定である。

(玉越氏)

実橋梁の損傷状況を把握するのは重要であり、今後、詳細な分析を行っていく必要がある。なお、この調査結果をもとに何をモニタリングしていくのか明にする必要がある。

例えば、このような橋梁であればどの部位に損傷が生じ、その損傷により生じる挙動がどのようなものなのか？という観点で考える必要がある。

(吉津氏)

損傷のうち、定着部の損傷の見分け方について整理する必要があるのでは？

(玉越氏)

本研究会の目的であるに合致したモニタリング方法を考える必要がある。

(金教授)

点検結果をもとに損傷状態を整理し、どの部位が損傷しやすいのか把握しモニタリング内容を決定する。

(玉越氏)

変状が生じる場合、どこに生じるのか把握する必要がある。それに対してモニタリングを行う際、日常通行荷重によるものでいいのか、季節変動の影響を観測する必要があるのか等を把握する必要がある。

これらに対して、モニタリングとは別に、何らかの検討を行い損傷シナリオの仮説を立てておくことが必要である。そして、両者の検討結果をもとに整理していくのが良い。

ターゲットとする橋梁については、行政ニーズに対して、何を知りたいのかという点を踏まえて検討する必要がある。そのために、実橋で生じている損傷箇所の整理を点検調書で行うとともに、吊り橋の形式等による損傷箇所の分類等を行う必要がある。

(吉津氏)

吊り橋形式の分類において、人道橋と車道橋を分類するのがいいのか？

(玉越氏)

疲労による損傷以外は、人道橋と車道橋の区別は不要である。

一般的な桁橋等であれば、対象橋梁の設計基準での分類することである程度対象橋梁の構造等は把握できるが、吊り橋の場合はその適用が難しい。そのため、吊り橋の構造形式において、どの部位が敏感に反応するのか、どの部位は鈍感なのかという点も踏まえた、モニタリングを行う必要がある。

吊り橋において、何がパラメータとなっているのか？、構造形式的なところを整理して把握する必要がある。

(八木教授)

資料整理では、まず、どの部位が損傷しているのかを調べる必要がある。

(玉越氏)

構造形式によって応答は全く異なることから、吊形式による特徴を生かした検討が必要である。

(吉津氏)

提供しているデータの橋梁形式は、点検調書である程度把握できる。

(玉越氏)

今回提供されている実橋梁に対して、実際生じている損傷状況を解析により検討しておく必要がある。この際、種々のパラメータを考慮した検討が必要である。対象とする実橋は、自治体と調整し決定する。

(吉津氏)

今後、入手する点検調書から得られる情報により、実橋の対象を決定する。

(金教授)

来年度モニタリング予定しているカラウコ大橋については、どのような観点で行えば良いか？

(八木教授)

本研究会は、“落橋しない”という着目点としていることから、メインケーブル、吊材を対象にすれば良い。主塔まで考えると非常に煩雑となる。

(金教授)

点検調書から損傷箇所、状況を洗い出し、損傷をカテゴライズ、パターンを特徴化する。それに対し、腐食及び破断等による影響を考慮した解析を実施し、点検結果との分析を行っていく。また、カラウコ大橋については、モデル化し解析も合わせて実施する予定である。なお、静的載荷試験を実施しモデルアップデートを行う。また、来年度は、点検結果の分析を委託する方向で考えている。

(八木教授)

計測でどのようなデータが取得できるのかモニタリングしてみれば、その結果を用いて解析で同定できる。そのための橋梁を提供できるのか？

(金教授)

カラウコ大橋については点検調書、及び図面等も存在するので問題ない。なお、吊り橋についても管内の橋梁を対象としてモデル橋を抽出する。

(吉津氏)

対象橋梁とする管理者である十津川町、古座川町、田辺市への対応は局で行う。

(金教授)

来年度の予算は、データ分析及びモニタリングに使用する予定である。

本日の内容を踏まえ、中間報告を行うこととする。

なお、吊り橋に対する構造的な検討項目をメール頂きたい(玉越氏に)

*1/17玉越氏からのメール

(分析項目)

- ・部材毎の材料
- ・ケーブルや定着の仕様・構造
- ・径間形式、桁形式、支承形式
- ・ハンガー形式
- ・寸法関係(塔、桁、幅員、など諸々組み合わせ)

(玉越氏)

ケーブルメーカーにて破断等の実験は実施していないのか。橋梁にかかわらずエレベータ等でも良いが。

(榊氏)

ケーブルを破断させる実験はしている。公開されている資料等を提供する。

(玉越氏)

最後に、モニタリングにおいてステイロープを対象にするのがいいかもしれない。メインケーブルより敏感に反応する可能性がある。

4. アドバイザー会議での説明(資料3-4)

(金教授)

本日議論頂いた内容も踏まえ、今年度の研究内容をまとめ報告する予定である。

5. 今年度の成果のまとめ

(金教授)

同様に、本日議論頂いた内容も踏まえ、今年度の研究内容をまとめ報告する予定である。

6. 来年度の活動

(金教授)

来年度は、モニタリングを予定しており、早い段階から活動していく予定である。来年度研究計画に沿った検討内容を行っていく。

(高祖氏)

5月若しくは6月に評価委員会が開催され、その結果をもとに来年度の契約となる。

— 以上 —

■新都市社会技術融合総合研究会

「長大橋の観測データの活用により維持管理支援システムの検討」プロジェクト

幹事団会合記録簿

日 時：2020年1月14日 10：00～11：30

場 所：京都大学桂キャンパス C1棟 金教授研究室

参加者：金教授、エイト日技小野氏、長大丸山

「長大橋の観測データの活用による維持管理支援システムの検討」プロジェクト
年度別の研究内容

年 度	研 究 内 容	備 考
令和元年度 本 大	① ケーブル構造の特殊橋の劣化特性や実態の精査 ② ケーブル構造の特殊橋のモニタリングの実態調査 ・長大橋の長期計測データ分析向けのデータ解析手法の整備 ③ 長期計測データにおける季節変動の調査	令和元年度 本大 丸山
令和2年度	<ul style="list-style-type: none"> ・定期点検の限界を補足できる条件の検討 ・特徴量と目視点検データとの相関検討 ・長期計測における季節変動成分の除去法の構築 ・モニタリングによるケーブルと定着部の腐食・破断検知法について検討 	
令和3年度	<ul style="list-style-type: none"> ・橋梁条件や架橋条件，着目すべきリスク事象に対するモニタリングの適用可能性と限界について検討・整理 ・センサー情報による橋梁維持管理への支援策 ・ケーブル構造を持つ特殊橋梁の維持管理指針の提案 	

■①について

整備局提供の資料をもとに整理を行う。なお、損傷が確認されている橋梁については、点検調書を提供頂き損傷状況の把握を行う。

また、自治体のヒアリング結果を踏まえ、点検マニュアル的な資料を作成する。

■②について

姫路河川国道管理のカラウコ大橋を対象に来年度モニタリングを行う。また、モニタリングでは画像解析による振動数把握も行う。なお、可能であれば載荷実験と固有値解析を併せて実施し、載荷実験結果との検証を行う。さらに、その結果を用いてケーブル損傷時の振動数の変化等が把握できればさらに良い。

また、同事務所管理の有年橋での観測データ等も引用して整理していくものとする。

■③について

本四の観測データを用い、今後、大学で検討する予定である。

香港から長期モニタリングデータ（風速、交通量、振幅等）を入手できる予定である。

本年度の作業としては、観測データの収集までとし、来年度以降に観測データから季節変動について調査、除去方法の構築を行っていく予定とする。

■その他

本年度の委託費用にて、センサーやモニタリング用の NAS サーバー等を購入する予定である。

以上

卷末資料

1. 特殊橋梁（吊り橋及び斜張橋）一覧表

：腐食に係る損傷
 :ケーブルの破断等に係る損傷

【吊り橋】全198橋

橋梁の諸元に関する調査項目

老朽化対策に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						架設年度	点検実施年月		
八雲橋	(ヤケモツ)	都道府県道	1956	114.8	1	6.2	京都府	H27年度	H27.03	III	
高瀬橋	(カハセ)	市町村道	1960	62	2	2	京都市	H27年度	H28.01	III	
鶴飼橋	(カハヅ)	都道府県道	1956	52	1	2.2	京都市	H28年度	H29.01	I	
辨天橋	(ハチンバシ)	市町村道	1966	101.3	1	1	綾都市				
上原橋	(カハラバシ)	市町村道	1954	96.5	2	3.7	綾都市	H28年度	H29.01	II	
大峰橋	(オホミネ)	市町村道	1965	120.8	1	3	宇治市	H29年度	H30.02	II	予防保全の観点から措置を講じることが望ましい状態。床版にひびわれ、下部工にひびわれ、遊離石灰が見られる。
天ヶ瀬吊橋	(アマガセツバシ)	市町村道	1942	54.2	1	2.1	宇治市	H29年度	H30.03	III	が臭られる。早期に措置を講ずべき状態。縦桁、横桁に激しい腐食が見られ、床版にカビ、コケの繁殖
長由利橋	(ナガユリ)	市道向山脈谷線	1959	54.8	1	1.6	南丹市	H28年度	H29.01	II	主桁、支承、その他鋼部材全体に防食機能の劣化が生じている。床版下面に鉄筋露出が点在している、互板部の剥離を講ずることが望ましい。
小幡橋	(オホハタ)	市町村道	1959	116.6	1	1.6	南丹市	H28年度	H29.01	II	主桁、支承、その他鋼部材全体に防食機能の劣化が生じている。床版下面に鉄筋露出が点在している、互板部の剥離を講ずることが望ましい。
文字畠地橋	(モジガハシ)	市町村道	1959	98	1	1.6	南丹市	H28年度	H29.02	II	主桁、支承、その他鋼部材全体に防食機能の劣化が生じている。床版の一部に鉄筋露出が生じている、かぶり不足が原因と考えられる。
小野橋	(オノハシ)	市道東廻小野橋線	1959	123.6	2	2.3	南丹市	H27年度	H27.12	II	路面に15mm程度の段差がみられる。鋼部材に腐食、橋脚に錆汁を伴う遊離石灰がみられる。経過観察が必要。
高山橋	(オホヤマハシ)	市町村道	1967	195.9	1	5	南山城村	H28年度	H29.01	II	
八幡橋	(ヤハタ)	市町村道	1968	160	1	3.5	奈良市	H30年度	H30.10	II	床版の鉄筋露出、下部工のひびわれ、遊離石灰等が見られるが、構造安全上問題は少ないため予防保全段階とする。
赤人橋	(アカヒト)	市道山辺三赤人橋線	1972	150	1	3.5	宇陀市	H29年度	H29.12	II	垂直面に腐食、床版と下部工にひびわれと遊離石灰、路面に凹凸が見られる。予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
とっくり吊橋	(トクリツバシ)	市町村道	不明	93	1	1	三郷町	H27年度	H27.10	II	

橋梁の諸元に関する調査項目										老朽化対策に関する調査項目			
施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		所見等 (任意)			
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		判定区分		
道路橋名 (フリガナ)			架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> ・ H26年度 ・ H27年度 ・ H28年度 ・ H29年度 ・ H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 				
葛橋	(カキカバシ)	市町村道	2001	50	1	1.2	曾爾村	H28年度	H27.12	II			
山口吊橋	(ヤマケチカバシ)	市町村道	1975	76	1	1.5	吉野町	H30年度	H31.01	II	杉板床版一部腐食。耐風策フェル定着部腐食あり。状況に応じて措置を講ずる必要がある。		
平尾吊橋	(ヒラノカバシ)	市町村道	1961	150	1	1.5	吉野町	H30年度	H31.01	III	橋頂サドルのボルト脱落や、ずれ、および吊り材ボルトがワイヤーにより摩耗している。早期に措置を講ずる必要がある。		
津風呂吊橋	(ツルカバシ)	市町村道	1961	96	1	1.6	吉野町	H30年度	H31.01	II	主桁、床版に腐食が見られる。状況に応じて措置を講ずる必要がある。		
中越橋	(ナカノカバシ)	市町村道	1951	34.5	1	1.5	天川村	H30年度	H31.03	II	主塔側面コンクリートが広範囲にうきが生じている。状況に応じて措置を講ずる必要がある。		
哀伝橋	(アイトカバシ)	市町村道	1992	88	1	1.5	天川村	H29年度	H29.11	II	ひびわれであるため経過観察とする。主桁にひびわれが見られるが、損傷は軽微であるが、PC橋の		
無名橋 1	(ムナカバシ)	市町村道	不明	22.1	1	1	天川村	H29年度	H29.11	I	使用禁止となっており、ロープによる規制が行われている。		
無名橋 3	(ムナカバシ)	市町村道	不明	18.3	1	1	天川村	H30年度	H31.03	I	通行に支障は有りません (架け替えされている。台帳更新)		
旧川津大橋	(キョウカワカバシ)	市町村道	1960	178.8	1	3.6	十津川村	H27年度	H27.09	IV	アンカー一部の亀裂は緊急措置、主索、吊索、耐風索は腐食対策が必要		
中井傍示橋	(ナカノカバシ)	市町村道	1940	39.1	1	0.6	十津川村	H28年度	H28.11	IV	木床版の腐朽・欠損が顕著にみられる		
宇無川橋	(ウツカバシ)	市町村道	1949	32.7	1	0.8	十津川村	H28年度	H28.11	IV	耐風索機能不良、アンカーブロック欠損		
殿井橋	(ノノカバシ)	市町村道	1961	37.6	1	0.5	十津川村	H28年度	H28.11	III	木床版の劣化、ワイヤーに腐食		
谷瀬大橋	(ヤセカバシ)	市町村道	1953	297.7	1	1	十津川村	H27年度	H27.11	III	吊索金具の摩耗		
山彦橋	(ヤマヒコカバシ)	市町村道	1961	84	1	1	十津川村	H27年度	H27.03	I	機能障害なし		
舟渡橋	(フナトカバシ)	市町村道	1971	97.9	1	1.9	十津川村	H27年度	H27.11	II	全体的に軽微な腐食		
柳本橋	(ヤナギモトカバシ)	市町村道	1957	90	1	1	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索アンカー一部の腐食		

橋梁の諸元に関する調査項目										老朽化対策に関する調査項目			
施設名		路線		架設年度		橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		所見等 (任意)	
道路橋名	路線名	道路種別	架設年度	架設年度	点検実施年度					点検実施年月	判定 区分		
	(ワカナ)				架設年度 (西暦4桁)					・ H26年度 ・ H27年度 ・ H28年度 ・ H29年度 ・ H30年度	・ I ・ II ・ III ・ IV		
林橋	村道林線	市町村道	1947	1947	186.3	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.11	III	主索、耐風索の他、主塔脚部が腐食	
込之上橋	村道河之平山手谷線	市町村道	1962	1962	161.2	1	0.9	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索の腐食	
猿飼橋	村道平谷猿飼線	市町村道	1945	1945	143.4	1	1.2	十津川村	H27年度	H27.12	IV	A1側の支索に変形亀裂、主塔変形	
沢渡橋	村道高岡線	市町村道	1959	1959	108.3	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.11	III	上流側、終点側主索断線および主索アンカー一定着部が断線。	
二津野大橋	村道二津野線	市町村道	1961	1961	193.2	1	0.9	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索、吊索、耐風支索に全体的に腐食が見られる。	
滝之穴橋	村道滝之穴線	市町村道	1961	1961	175.6	1	0.7	十津川村	H27年度	H27.11	IV	橋面は全体的に著しく腐朽し、吊索の一部が破断。	
千切橋	村道奥里線	市町村道	1948	1948	64	1	1.5	十津川村	H27年度	H27.11	III	主索、耐風索腐食	
池穴橋	村道池穴中原橋	市町村道	1931	1931	117.5	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.11	IV	主索の断線、緩みが見られ、木床版は全体的に腐朽している。	
中原橋	村道池穴中原橋	市町村道	1945	1945	113.2	1	0.7	十津川村	H27年度	H28.03	IV	損傷が著しく本格的な補修が必要	
熊谷橋	村道戸下葛川線	市町村道	1944	1944	17.9	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.03	II	腐食対策を講ずることが望ましい	
下番橋	村道片川線	市町村道	1965	1965	18.8	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.03	I	機能障害なし	
赤嶋橋	村道真砂瀬七ツ森線	市町村道	1974	1974	85.5	1	0.9	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索アンカー一部に断線	
崩原橋	村道崩原線	市町村道	1976	1976	25.6	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.03	II	腐食対策が望ましい	
小壁橋	村道下も小壁線	市町村道	1948	1948	55.8	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.12	III	耐風支索以外のワイヤー部材に腐食が見られ吊索は複数箇所断線。	
大野出合橋	村道高滝小川線	市町村道	不明	不明	84	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.12	IV	主索の断線	
高橋	村道大野線	市町村道	1951	1951	29	1	1	十津川村	H27年度	H28.03	II	腐食対策が望ましい	

橋梁の諸元に関する調査項目										老朽化対策に関する調査項目			
施設名		路線			架設年度		橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		所見等 (任意)
道路橋名	(フリガナ)	路線名	道路種別	架設年度	架設年度 (西暦4桁)	点検実施年度					点検実施年月	判定 区分	
片川橋	(カガハシ)	村道大野線	市町村道	1963	1963	47.7	1	1	十津川村	H27年度	H27.12	III	耐風素アンカー一部断線
瀬戸谷橋	(セトニバシ)	村道瀬戸谷線	市町村道	1966	1966	36	1	1	十津川村	H27年度	H27.11	III	床素の腐食
下地橋	(シジバシ)	村道下地高原線	市町村道	1959	1959	62	1	1.4	十津川村	H27年度	H27.11	III	ワイヤー部の腐食
湯之原橋	(ユハラバシ)	村道湯之原舟谷線	市町村道	1934	1934	112.8	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.03	IV	腐食対策が望ましい
坂本橋	(サカモトバシ)	村道豆土地谷線	市町村道	1976	1976	27.6	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.02	II	腐食対策が望ましい
湯之野橋	(ユノバシ)	村道湯之野谷線	市町村道	1960	1960	50.3	1	1	十津川村	H27年度	H27.05	II	床板の抜け落ち、主索などの腐食対策
新尾橋	(ニヘバシ)	村道新尾線	市町村道	1965	1965	31	1	0.9	十津川村	H27年度	H27.11	III	主索、耐風素、主材ワイヤー、横桁が腐食。
中根橋	(ナネバシ)	村道新尾線	市町村道	1951	1951	14.9	1	0.7	十津川村	H27年度	H27.05	III	耐風素の破断対策が必要
和平橋	(ヘイバシ)	村道和平線	市町村道	1942	1942	32.6	1	0.6	十津川村	H27年度	H27.12	IV	主索、耐風素の腐食が進んでおり、主索には断線が見られる。
津越野橋	(ツノバシ)	村道津越野線	市町村道	1955	1955	58.1	1	0.6	十津川村	H27年度	H27.11	III	主索、耐風素の腐食
大樽曾橋	(オビゾバシ)	村道大樽曾線	市町村道	不明	不明	25.4	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.11	IV	主索の固定部の木が腐食している断線している
大杉谷橋	(オシバシ)	村道大杉谷線	市町村道	1959	1959	23.8	1	1	十津川村	H27年度	H27.05	II	主索・吊索・耐風素の腐食対策が必要
鹿淵橋	(カハシ)	村道七色鹿淵線	市町村道	1959	1959	150.6	1	0.8	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索、耐風素の腐食
上番橋	(カミバンバシ)	村道笠格溝線	市町村道	1969	1969	22.7	1	0.8	十津川村	H27年度	H28.03	II	主索・吊索・高欄の腐食対策が望ましい
下番橋	(シモバンバシ)	村道笠格溝線	市町村道	1969	1969	25.2	1	1.5	十津川村	H27年度	H28.03	II	主索・吊索・高欄の腐食対策が望ましい
福田前橋	(フクダマエバシ)	村道笠格溝線	市町村道	1971	1971	22.5	1	1.3	十津川村	H27年度	H28.03	II	主索、主塔、吊索、高欄の腐食対策を講ずるのが望ましい

橋梁の諸元に関する調査項目										老朽化対策に関する調査項目				
施設名		路線			架設年度		橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録			所見等 (任意)
道路橋名	(フリガナ)	路線名	道路種別	架設年度	架設年度 (西暦4桁)	点検実施年度					点検実施年月	判定 区分		
下渡瀬橋	(シモワセバシ)	村道笠捨瀬線	市町村道	1969	18.1	1	1.2	十津川村	H27年度	H27.12	III	主索、吊索の腐食。耐風索と耐風支索は破断。	所見等 (任意)	
中番橋	(ナカバンバシ)	村道上葛川立合線	市町村道	1971	21.6	1	0.6	十津川村	H27年度	H28.03	II	主索、吊索の腐食。耐風索と耐風支索は破断。		
田戸橋	(タノバシ)	村道瀬線	市町村道	1971	31.3	1	0.6	十津川村	H27年度	H27.12	IV	主索、耐風索定着部に腐食、断線		
滝見橋	(タキミバシ)	村道西原小樽線	市町村道	1964	41.7	1	2.5	上北山村	H27年度	H28.01	II			
宮ノ平橋	(ミヤノヘラバシ)	村道白川13号線	市町村道	1964	186.7	1	0.9	上北山村	H30年度	H30.12	III	吊り材たわみ、格点のボルト脱落、サドル腐食等、橋の健全性が損なわれていることから対応策を必要とする。		
梅津呂橋	(ウメヅロバシ)	田辺龍神線	都道府県道	不明	62.3	1	2.1	和歌山県	H28年度	H26.12	III	本橋は歩道用吊り橋で、足場板に著しい腐朽、部分的な結束線の切断がある。		
加伊多橋	(カイトバシ)	市道七山20号線	市町村道	1954	80	1	3.3	海南市	H30年度	H31.02	II	主ケーブル、基礎アンカーに広範囲で腐食、防食機能の劣化が見られた。		
竹ノ瀬橋	(タケノセバシ)	市道龍線	市町村道	1955	62	1	2	田辺市	H27年度	H28.02	II			
初鹿野橋	(ハツカノバシ)	市道片ノ瀬初鹿野線	市町村道	1961	50.6	1	1.6	田辺市	H27年度	H28.02	II			
中野津橋	(ナカノヅバシ)	市道広井原裏道線	市町村道	1998	72.4	2	2	田辺市	H27年度	H28.02	II			
板弦橋	(イタヅルバシ)	市道広井原裏道線	市町村道	1991	72.8	3	2	田辺市	H27年度	H28.02	II			
仲橋	(ナカバシ)	市道滝頭細原線	市町村道	1969	74.1	3	2	田辺市	H28年度	H28.01	II			
筋川橋	(スジガハシ)	市道中原大垣内線	市町村道	1981	53.2	1	1.8	田辺市	H27年度	H28.01	III			
瀬詰橋	(セツメバシ)	市道大垣内山道地線	市町村道	1945	76.9	1	1.5	田辺市	H27年度	H28.01	II			
柘脇橋	(シラキバシ)	市道広瀬栃谷線	市町村道	1961	76.8	1	1.6	田辺市	H27年度	H28.01	III			
八幡橋	(ヤマトバシ)	市道青田殿垣内線	市町村道	1935	40.9	1	1.6	田辺市	H27年度	H28.03	III			

老朽化対策に関する調査項目

橋梁の諸元に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		
道路橋名 (フリガナ)			架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> ・ H26年度 ・ H27年度 ・ H28年度 ・ H29年度 ・ H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 		
神の平橋	市道神ノ平合口線	市町村道	1960	72.4	1	1.6	田辺市	H27年度	H28.01	II	
湯本小橋	市道湯本皆瀬線	市町村道	1981	62	3	2.5	田辺市	H27年度	H28.02	II	
柿原橋	市道柿原線	市町村道	1956	51.4	2	2	田辺市	H27年度	H28.02	II	
柿平橋	市道中南谷諸嶋線	市町村道	1982	48.7	1	1.8	田辺市	H27年度	H28.03	II	
今西橋	市道井の木赤木線	市町村道	1996	70.7	3	2	田辺市	H27年度	H28.03	II	
新生橋	市道今西串線	市町村道	1955	53.1	1	1.6	田辺市	H29年度	H29.08	I	木製の橋脚には、上部工の力が伝達されておらず、必要に応じて、撤去することが望ましい。木材舗装の局部的な腐食、留め具の着脱一部破断がみられる。損傷は軽微であり、状況に応じて補修を要するのが望ましい。
清水橋	市道原日浦線	市町村道	1963	78.4	2	2.3	田辺市	H29年度	H29.09	II	ボルトの余長不足がみられるため、早期の補修が望ましい。桁端部に桁厚減少を伴う腐食、また、吊材、耐風支索に施工不良 (クリップの取付数不足、
裕の花橋	市道裕の花線	市町村道	1977	130	3	1.9	田辺市	H29年度	H30.02	III	吊材に著しい桁厚減少を伴う腐食および木材に腐朽が広範囲にみられるため、早期の取替え、補修が必要である。
滝浦橋	市道滝浦虎ヶ峯線	市町村道	1955	76.7	1	1.8	田辺市	H29年度	H29.09	II	経年劣化による各種変状および吊材、耐風支索に施工不良 (ボルトの余長不足、クリップの逆止め)がみられるため、早期の補修が望ましい。
宇津木橋	市道芝宇津木線	市町村道	1963	115.4	4	2.3	田辺市	H29年度	H29.09	II	その他、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
龍ノ小橋	市道皆瀬宮前線	市町村道	1984	58	1	1.5	田辺市	H29年度	H29.09	I	現状では損傷が軽微であり補修の必要性はないが、施工不良、土砂詰りは状況に応じて補修を行うのが望ましい。
松皮橋	市道松皮線	市町村道	1953	84.2	1	1.6	田辺市	H29年度	H29.08	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
水倉橋	市道小森線	市町村道	1971	20.5	1	1.5	田辺市	H29年度	H29.09	II	その他、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。床版木材の番線の破断が散在している。
赤ツボ橋	市道小森線	市町村道	1986	21.3	3	1.4	田辺市	H29年度	H29.09	II	経年劣化による各種変状および高欄の弛緩がみられるため、早期の補修が望ましい。
小森谷橋(4号)	市道小森線	市町村道	1981	17.5	1	1.4	田辺市	H29年度	H29.09	II	床版木材の番線の破断が散在している。予防保全の観点から早期の補修が望ましい。
西垣内橋	市道五百原谷線	市町村道	1988	25	1	1.9	田辺市	H29年度	H29.10	II	高欄および耐風支索に破断、また樹木の接触がみられるため、早期の補修が望ましい。

橋梁の諸元に関する調査項目

老朽化対策に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		
道路橋名 (アガナ)		<ul style="list-style-type: none"> 高速自動車国道 一般国道(指定区間) 一般国道(指定区間外) 都道府県道 市町村道 	架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> H26年度 H27年度 H28年度 H29年度 H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ H26. 4 ・ ・ ・ H29. 3 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 	
吾の橋	市道吾口4号線	市町村道	1965	72.5	2	1.5	田辺市	H29年度	H29. 12	II	橋脚継手に破断がみられる。また、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
清水垣内橋	市道清水垣内線	市町村道	1964	44.2	1	1.2	田辺市	H29年度	H29. 11	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
谷ノ口橋	市道谷ノ口線	市町村道	1962	38.3	1	1.1	田辺市	H29年度	H29. 10	III	その他、耐風索の弛緩など吊橋の構造に影響が大きい損傷がみられるため、早期の補修が必要である。主ケーブル、耐風索の定着部が不安定な可能性がある。
岩本橋	市道岩本線	市町村道	1962	31.3	1	1.2	田辺市	H29年度	H29. 10	III	右岸側塔柱は、鋼製の塔柱で代替されているが、塔柱が転倒した場合は落橋の危険性があるため早期の撤去が必要である。
串橋	市道串線	市町村道	1962	76	2	1.1	田辺市	H29年度	H29. 10	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
高野橋	市道高野1号線	市町村道	1961	39	1	1.4	田辺市	H29年度	H29. 10	II	現況では欄干は軽微だが継ぎのゆるみ、主要部材に腐食や樹木の接触がみられるため、早期に補修が望ましい。
中村橋	市道中村線	市町村道	1961	37.2	1	1.5	田辺市	H29年度	H29. 10	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
ウグイ玉橋	市道ウグイ玉線	市町村道	1961	46	1	1.5	田辺市	H29年度	H29. 10	II	主ケーブル、耐風索に施工不良(クリップの取付数不足)がみられるため、早期に補修が望ましい。
高根橋	市道高根線	市町村道	1975	30.5	1	1.2	田辺市	H29年度	H29. 11	II	の施工不良)がみられる。また、塔柱、主ケーブルに腐食がみられるため、早期の補修が望ましい。主ケーブルに施工不良(ワイヤクリップの逆さ施工)および耐風索の施工不良(アイスブラリス
宮前橋	市道川宮前橋	市町村道	1960	42.6	1	1.5	田辺市	H29年度	H29. 10	II	アンカレイジ定着部にうきがみられるため、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
川根橋	市道川根3号線	市町村道	1969	80.4	1	1.5	田辺市	H29年度	H29. 11	III	その他、床版断面に地盤がみられ異常なたわみが発生しているため、早期の補修が必要である。耐風索および耐風支索のすべてが破断または床版の板が腐朽し破断がみられる。
川湯開拓橋	市道川湯開拓橋線	市町村道	1970	58.4	2	2.7	田辺市	H29年度	H30. 01	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
松平橋	市道曲川橋葉線	市町村道	1951	19.6	1	2	田辺市	H29年度	H29. 12	III	外力による変形が生じているため、早期の補修が必要である。桁端部の継ぎに腐朽による破断がみられる。また、吊材の腐食による欠損および
和田橋	市道和田平線	市町村道	1961	71.9	1	1.5	田辺市	H29年度	H29. 02	II	逆キャンパー(異敷なたわみ)となっている。その他、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。左右の主ケーブルのサグ量が異なるため、路面に傾きが生じている。また、サグ量が大きく路面が
松平橋	市道河内平1号線	市町村道	1958	60.6	1	1.4	田辺市	H29年度	H30. 02	II	著しい板厚減少を伴う腐食、アンカレイジの定着部に欠損がみられるため、早期の補修が望ましい。支承直下のコンクリートに充填不足がみられ、アンカーボルトが効いていない。また、鋼部材に

橋梁の諸元に関する調査項目

老朽化対策に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		
道路橋名 (フリガナ)			架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> ・ H26年度 ・ H27年度 ・ H28年度 ・ H29年度 ・ H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 		
検和瀬橋 (ワダハシ)	市道野竹線	市町村道	1959	31.8	1	1.5	田辺市	H29年度	H30.01	III	また、床版、及び縦桁の腐朽が進み破断に至っているため、早期の補修が必要である。吊材に局部的な板厚減少を伴う腐食がみられる。
もみじ橋 (モミジハシ)	市道白河線	市町村道	1967	24.2	1	1.4	田辺市	H30年度	H31.01	III	各種部材に著しい腐朽がみられる。また高欄、耐風策などに破断が生じているため、早期の補修が必要である。
坊平橋 (ホウヘイハシ)	市道小野大前線	市町村道	1980	48.1	1	1.5	田辺市	H29年度	H30.02	II	経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
小森谷橋(5号) (コモリガコウゴ5号)	市道小森線	市町村道	不明	8.7	1	1.4	田辺市	H29年度	H29.09	II	吊材及び塔頂サドルに板厚減少をともなう腐食がみられる。その他、経年劣化による各種変状がみられるため、早期の補修が望ましい。
松皮小橋 (マツカダハシ)	市道松皮線	市町村道	不明	12.5	1	2.1	田辺市	H29年度	H29.08	II	敷索の定着部に著しい腐食がみられるため、早期の補修が望ましい。
小森谷橋(11号) (コモリガコウ11号)	市道小森線	市町村道	不明	5	1	0.6	田辺市	H30年度	H31.01	III	主桁に腐朽が全体的にみられる。著しい断面欠損を生じていることから早期に措置を講じることが望ましい。
下地吊橋 (ゲノツリハシ)	市道下地懸原線	市町村道	1954	28.8	1	2.2	新宮市	H30年度	H30.09	III	
引土吊橋 (ヒキツリハシ)	市道瀧本懸原線	市町村道	1963	24	1	2.2	新宮市	H30年度	H30.09	III	
小口吊橋 (コガチハシ)	市道歌姫2号線	市町村道	1955	15.9	1	1.8	新宮市	H30年度	H30.09	III	
桑ノ木橋 (クワキハシ)	市道相賀渡石線	市町村道	1994	36	1	2.3	新宮市	H30年度	H30.10	I	構造物の機能に支障が生じていない状態である。
大坪橋 (オホツツハシ)	市道高田添谷線	市町村道	1945	34	1	1.8	新宮市	H30年度	H30.10	II	吊り材に素縁切れ、過度の移動がみられる。予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態である。
仲瀬橋 (ナカセハシ)	市道西山1号線	市町村道	1945	29.7	1	2.4	新宮市	H30年度	H30.09	III	
栗山橋 (クリヤマハシ)	市道七瀬下地線	市町村道	1954	36.7	1	1.5	新宮市	H30年度	H30.09	II	
栗須吊橋 (クリスリハシ)	市道歌姫1号線	市町村道	1955	30.2	1	1	新宮市	H30年度	H30.09	III	
舟橋 (フネハシ)	市道中ノ川線	市町村道	2007	72	1	5.2	新宮市	H29年度	H30.01	II	
相須平橋 (アイダハシ)	市道相須平線	市町村道	1971	79.2	1	2	新宮市	H30年度	H30.09	III	

橋梁の諸元に関する調査項目

施設名		路線		架設年度		橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録			所見等 (任意)
道路橋名 (フリガナ)	路線名	道路種別	架設年度	点検実施年度	点検実施年月					判定 区分			
赤木川橋	(アキガカワシ)	市町村道	1931	H29年度	H30.02	80.2	1	3.5	新宮市	H26年度 H27年度 H28年度 H29年度 H30年度	H26.4 . . . H29.3	I . II . III . IV	所見等 (任意)
前畑橋	(マエハタシ)	市町村道	1955		41	1	2.1	紀美野町		H28年度	H28.11	I	
高橋	(タカハシ)	市町村道	1957		35	1	1.5	紀美野町		H28年度	H28.12	I	
宮前橋	(ミヤマエシ)	市町村道	1955		50	1	2	紀美野町		H28年度	H28.12	I	
滝の瀬橋	(タキノセシ)	市町村道	1954		40	1	2	紀美野町		H29年度	H29.09	II	防護柵及び床板、主桁、横桁に塗装の剥離及び錆がみられるため、ケレン及び再塗装が必要。
高橋	(タカハシ)	市町村道	1956		40	2	1.7	紀美野町		H29年度	H29.09	II	防護柵に塗膜の剥離が見られることから、ケレン及び塗装が必要。
前瀬橋	(マゼハシ)	市町村道	1956		40	1	1.5	紀美野町		H29年度	H29.09	I	特に異常は見られない。
高野橋	(タカノハシ)	市町村道	1959		36	1	1.5	かつらぎ町		H30年度	H30.11	I	判定区分II以上なし
観音橋	(カンノハシ)	市町村道	1957		81	4	1.9	かつらぎ町		H30年度	H30.12	III	その他(変形・欠損)一部材の更新が望ましい 破断一部材の更新が望ましい
瀧見橋	(タミハシ)	市町村道	1986		55	1	2	かつらぎ町		H30年度	H30.11	II	ひびわれ—ひびわれ補修工法等による補修
やな原橋	(ヤナハラシ)	市町村道	1959		32	1	1.5	かつらぎ町		H30年度	H31.03	II	その他(うき) —断面修復工法による補修
大柳橋	(オオヤナギハシ)	市町村道	1960		26	2	3.2	九度山町		H28年度	H28.11	II	
玉橋	(タマハシ)	市町村道	1960		40	1	2	九度山町		H28年度	H28.11	II	
湯の本橋	(ユノモトハシ)	市町村道	1958		35.7	1	1.5	有田川町		H27年度	H28.01	II	
谷口橋	(ヤノグチハシ)	市町村道	1957		51	1	2	有田川町		H27年度	H28.01	I	
中戸橋	(ナカドハシ)	市町村道	1958		86.3	4	1.5	有田川町		H27年度	H27.05	II	

老朽化対策に関する調査項目

橋梁の諸元に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別 ・ 高速自動車国道 ・ 一般国道(指定区間) ・ 一般国道(指定区間外) ・ 都道府県道 ・ 市町村道						架設年度 (西暦4桁)	点検実施年度		
道路橋名 (フリガナ)											
平野橋	(ヒノハシ)	市町村道	1955	119.5	7	1.5	有田川町	H27年度	H27.05	II	
中之組橋	(ナカノミ)	市町村道	1956	72.9	1	2	有田川町	H27年度	H28.01	II	
植木橋	(ウエキハシ)	市町村道	1961	94.4	6	1.6	有田川町	H27年度	H28.01	III	
蔵王橋	(サクラハシ)	市町村道	1966	160.9	1	2	有田川町	H27年度	H28.01	II	
廣井原橋	(ヒロイハラシ)	市町村道	1984	37.2	1	3	有田川町	H27年度	H27.12	III	
亀石橋	(カメイシ)	市町村道	1959	56	1	1.5	有田川町	H27年度	H28.01	II	
大岩橋	(オオイシ)	市町村道	1982	59.2	1	2	有田川町	H27年度	H28.01	I	
浜出橋	(ハマデハシ)	市町村道	1987	72	1	2.1	有田川町	H27年度	H28.01	I	
鳴滝歩道橋	(ナリタキドクサハシ)	市町村道	2007	80	1	2	日高川町	H28年度	H29.02	I	
笠松橋	(カサマツ)	市町村道	1993	110.8	2	2	日高川町	H28年度	H29.02	I	
里谷橋	(サトヤハシ)	市町村道	1960	73	1	1.5	白浜町	H28年度	H29.12	III	その裡、施工不良および経年劣化による腐食がみられるため、早期の補修が必要である。主構造の鋼材に板厚減少を伴う著しい腐食がみられ、一部破断に至っている部材も存在する。
小房橋	(オノボリハシ)	市町村道	1960	120	3	1.5	白浜町	H29年度	H29.11	III	橋梁構造の安全性の観点から早期の補修が必要である。吊材に強靱・破断・補剛桁に欠損・破断がみられ、床版に異常なたわみが発生している。
葛原橋	(カズハラハシ)	市町村道	1960	83	1	2	白浜町	H29年度	H29.12	III	橋の耐力低下が懸念されるため早期の補修が必要である。橋の耐力低下が懸念されるため早期の補修が必要である。床版に異常なたわみが発生している。
筑紫橋1号橋	(ツクシハシ1号)	市町村道	2013	53	1	1.6	那智勝浦町	H30年度	H30.09	III	湾筋付近で、主に床版と横桁での変形と異常なたわみ有り。早期措置が必要。
成井谷橋	(ナリイダニハシ)	市町村道	1949	23	1	2	古座川町	H30年度	H30.10	II	鋼材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。木部材に腐竹箇所が確認されるが、経過観察を含めて予防保全段階とする。
桑滝橋	(クワタキハシ)	市町村道	1927	35	1	1.1	古座川町				

橋梁の諸元に関する調査項目

老朽化対策に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		
道路橋名 (フリガナ)		<ul style="list-style-type: none"> 高速自動車国道 一般国道(指定区間) 一般国道(指定区間外) 都道府県道 市町村道 	架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> H26年度 H27年度 H28年度 H29年度 H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ H26. 4 ・ ・ ・ ・ H29. 3 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 	
成美川橋	(カミガワ)カハシ	市町村道	1954	21	1	1.9	古座川町	H30年度	H30. 09	II	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。
栗須橋	(クリスガ)カハシ	市町村道	1930	30	1	1	古座川町				
うのす橋	(ウノスガ)カハシ	市町村道	1959	37	1	2	古座川町	H30年度	H31. 01	II	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。構材について桁厚減少が確認されるが局部的なため、予防保全段階とする。
小松谷橋	(コマツガ)カハシ	市町村道	1954	42	1	1.5	古座川町				
金山橋	(ヤマノ)カハシ	市町村道	1963	68. 4	1	2	古座川町	H28年度	H28. 09	II	経年劣化により鋼部材のほぼ全ての部材に腐食・防食機能の劣化が該当する。腐食の範囲は大きいが損傷程度は軽微であるため、健全度はⅡの【道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置すべき状態】だと判断される。
真砂橋	(マコゴ)カハシ	市町村道	1960	54. 2	1	3. 2	古座川町	H28年度	H29. 02	II	アンカー定着部に断面減少を伴う腐食が見られた他、その他部材にナットの脱落、腐食等が確認された。床版下面には剥離・鉄筋露出等が確認された。予防保全の観点より早期的な措置が望ましい。
三尾の口橋	(ミノノグチ)カハシ	市町村道	1950	42	1	1. 5	古座川町	H30年度	H30. 09	II	鋼部材において局所的で軽微な防食機能の劣化が確認される。構材のナットゆりのみが確認されるが緊急性はないため、予防保全段階とする。
添野川参宮橋	(ソノノガハ)カハシ	市町村道	1948	21	1	1	古座川町	H29年度	H30. 02	II	鋼材全体に腐食や防食機能の劣化が生じている。また床版・鋪装も鋼材であるため、局所的であるが孔食も見られる。本橋の損傷は軽微であるが、判定はⅡと判断する。
平井川橋	(ヒライガ)カハシ	市町村道	1963	73	1	2. 1	古座川町	H28年度	H28. 09	II	アーチ吊り材、ケーブル定着部等、主要部材全域に発錆が生じている。緊急性は認められないが、予防保全の観点より措置を講じる事が望ましい。
前平橋	(マエヒラ)カハシ	市町村道	1956	54	1	1. 4	古座川町	H30年度	H30. 10	III	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。主索については腐食による断面減少が認められるため、早期措置段階とする。
龍頭橋	(リウツウ)カハシ	市町村道	1958	36	1	1. 5	古座川町	H30年度	H30. 10	III	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。A2橋台間の木部材(縦桁)の腐朽が進行しているため、早期措置段階とする。
栗山橋	(クリヤマ)カハシ	市町村道	1960	30. 8	2	2. 6	古座川町	H28年度	H28. 12	II	1径間においては、主桁部の打継目に進行が懸念される損傷が確認された。また、橋脚部では程度の深い洗掘が見られた。2径間においては、上部工部材に腐食・防食機能の劣化等の損傷が全体的に見られた。予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態と判断される。

老朽化対策に関する調査項目

橋梁の諸元に関する調査項目

施設名	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検記録		判定 区分	所見等 (任意)
	路線名	道路種別						点検実施年度	点検実施年月		
道路橋名 (フリガナ)			架設年度 (西暦4桁)					<ul style="list-style-type: none"> ・ H26年度 ・ H27年度 ・ H28年度 ・ H29年度 ・ H30年度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ I ・ II ・ III ・ IV 		
松根参宮橋	(マツネガキカバシ)	市町村道	1959	33	2	1.6	古座川町	H30年度	H30.10	III	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。腐食の進行による破断箇所も確認されることから、早期措置を要する。
田川橋	(カキカバシ)	市町村道	1959	45.8	1	3.1	古座川町	H28年度	H28.12	II	主要部材の主な損傷として、部材の全体的に腐食や防食機能の劣化等の損傷が確認された。また、塔柱や水平材には遊離生や鉄粉露出等の損傷も見られた。下部工においては遊離石灰や雑草が見られ、下部工その他では表面部の剥離等の損傷が見られた。予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態だと判断される。
宮の平橋	(ミヤノダラバシ)	市町村道	1954	36	1	2	古座川町	H30年度	H31.01	II	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。
上地橋	(カミジバシ)	市町村道	1963	179	2	2	古座川町	H30年度	H31.01	II	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。腐食の進行による著しい断面減少は起きていないため、予防保全段階とする。
小屋野橋	(コヤノバシ)	市町村道	1956	55	1	1.3	古座川町				
下蔵土橋	(シモクラバシ)	市町村道	2002	88	1	2	古座川町	H28年度	H28.12	I	主要部材の主な損傷として、橋台に生じた軽微なひびわれやPC定着部の局所的な防食機能の劣化及び、下部構造(その他)に見られた不法占用の損傷が確認された
添谷橋	(ソエダニバシ)	市町村道	1950	35	1	1	古座川町	H30年度	H31.01	III	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。腐食した床版を第三者が踏み抜く可能性があるため、早期措置を要する。
船原橋	(フナハラバシ)	市町村道	1955	16	1	1.9	古座川町	H30年度	H30.10	III	木部材において腐朽の促進による変形・欠損が確認される。床版を踏み抜く等の第三者被害が想定されることから、早期措置を要する。
下地橋	(シモヂバシ)	市町村道	1953	68	1	1.5	古座川町	H30年度	H30.09	II	鋼部材において若干の防食機能の劣化及び腐食が確認される。構造物の機能へ直ちに支障が生じる損傷はないため、予防保全段階とする。
栗ノ木橋	(クリノキバシ)	市町村道	1948	43	1	2	古座川町	H30年度	H30.09	II	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。構造物の機能へ直ちに支障が生じる損傷はないため、予防保全段階とする。
川向橋	(カマムイバシ)	市町村道	1959	21	1	1.7	古座川町	H30年度	H30.10	III	鋼部材において防食機能の劣化とそれに伴う腐食が確認される。構付定着部のナットの脱着が多数確認されることから、早期措置を要する。
丸ノ元橋	(マルノヘバシ)	市町村道	1990	15.5	1	2.5	串本町	H29年度	H29.10	II	高欄が壊滅し安全性が低下するも、通行規制中につき、予防的修繕とする。

【斜張橋】全8橋		老朽化対策に関する調査項目									
		<ul style="list-style-type: none"> ：腐食に係る損傷 ：ケーブルの破断等に係る損傷 									

施設名	道路橋名 (フリガナ)	路線		架設年度	橋長 (m)	径間数	幅員 (m)	管理者名	点検実施年度	点検実施年月	判定区分	所見等 (任意)
		道路種別	路線名									
新線部大橋	(シタマハ、チカハ)	一般国道173号	一般国道(指定区間外)	1988	391.8	7	10.8	京都府	H29年度	H26.4	II	鋼材の防食対策、コンクリート補修を行うことが望ましい。主要部材を含め各部材に損傷が見られる。橋面からの漏水対策後
舞鶴クレインブリッジ	(マヅ、ルルカワ、リツジ)	市道大波下浦入線	市町村道	1999	735	5	11.2	舞鶴市	H28年度	H26.07	II	構造物の機能に支障が生じるような損傷は認められない。ケーブルカバーの劣化、伸縮装置からの漏水、地覆の腐食等は速やかに補修する必要がある。
大間橋	(オホマ)	市道間人漁港線	市町村道	1997	136	2	8	京丹後市	H29年度	H30.03	II	PO定着部の保護管及び、高欄の腐食が見られた他、ケーブルの制振装置も数カ所破損しているが、構造物の機能に支障は生じていない。
向山橋	(ムカヤマ)	市道小瀬向山線	市町村道	2008	200	3	7.5	南丹市	H30年度	H30.12	II	塔柱、主桁、下部工、床版にひびわれ、漏水・遊離石灰が見られる。予防保全対策が望ましい。
白屋橋	(シラヤシ)	村道北塩谷白屋線	市町村道	1991	224.7	2	6.2	川上村	H30年度	H30.11	II	主桁、横桁のひびわれ、主桁、床版の漏水、遊離石灰、下部工のひびわれは橋の健全性を損なう程ではないが経過観察を必要とする。
有田中央大橋	(アリタ、チホ、チカハ)	市道637号線	市町村道	1998	286	2	11.5	有田市	H28年度	H28.11	I	
高橋	(タカハシ)	町道下和佐野口線	市町村道	2018	28.5	1	2	日高川町	H28年度	H29.03	I	
白石橋	(シライハシ)	町道三段線	市町村道	1990	68	1	3	白浜町	H29年度	H29.09	III	斜材の定着部に著しい損傷がみられるため、早期の詳細調査が望ましい。経年劣化による各種変状がみられる。